

***INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-
MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR
LA QUALITE DU BLE EN COURS DE
STOCKAGE***

Présentée par

FOURAR-BELAIFA Rebiha

Promoteur : Bouznad Z. Professeur à l'E.N.S.A. d'El Harrach

11/04/2013

Président Bellal M. M. Professeur à l'E.N.S.A. d'El Harrach Fleurat-Lessard F. Chargé Recherche
1ère Classe INRA Bordeaux Mouhouche F. Professeur à l'E.N.S.A. d'El Harrach Benmoussa M.
Professeur à l'Université de Blida Soltani N. Professeur à l'Université de Annaba

Table des matières

Dédicace . . .	5
AVANT-PROPOS . . .	6
RESUME . . .	8
ABSTRACT . . .	10
ص غلم . . .	12
ABREVIATIONS UTILISEES . . .	13
INTRODUCTION GENERALE . . .	15
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE . . .	19
I -Données sur les céréales transformées en Algérie. . .	19
1.1-Importance économique de la production locale et des importations de céréales. . .	19
1.2-Variétés disponibles en Algérie. . .	21
II -Paramètres influant sur l'aptitude au stockage et l'état sanitaire des grains. . .	21
2-1-Au champ. . .	22
2.2-Au cours du stockage . . .	22
2.3-Structure et composition des grains de céréales. . .	26
2.4-Aspects qualitatifs. . .	28
III -Les bioagresseurs des céréales en post-récolte. Impacts sur les différentes composantes de la qualité et réglementation. . .	34
3.1-Principaux insectes ravageurs des stocks. . .	35
3.2-Succession des peuplements. . .	37
3.3-La microflore des grains . . .	38
3.4-Effets des bioagresseurs des grains stockés sur les différentes composantes de la qualité. . .	43
3.5-Spécifications réglementaires des caractéristiques technologiques des blés et dérivés et des contaminants dans l'alimentation. . .	47
IV -Préservation de la qualité des grains stockés. . .	49
4.1-Nouvelle approche globale de la protection antiparasitaire intégrée. . .	49
4.2-Approche intégrée de la maîtrise de la qualité des stocks par les systèmes experts. . .	52
PARTIE EXPERIMENTALE . . .	54
A-PREMIERE PARTIE. ESSAIS PRELIMINAIRES D'ORIENTATION METHODOLOGIQUE. . .	55
1-MATERIEL ET METHODES . . .	55
2-RESULTATS ET DISCUSSION . . .	65
3-CONCLUSION . . .	99
B-DEUXIEME PARTIE. Evolution de la qualité sanitaire et technologique du blé tendre en conditions de stockage à risques (humidité et infestation par <i>Sitophilus oryzae</i> L.). Ecologie de la microflore fongique sous l'effet de cette infestation. . .	100
1-MATERIELS ET METHODES . . .	100
2-RESULTATS ET DISCUSSION . . .	108
3-DISCUSSION . . .	142
CONCLUSION GENERALE . . .	145

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES . .	147
ANNEXES . .	163
Annexe 1 : relative aux analyses de variance de la première partie expérimentale. Essais préliminaires d'orientation méthodologique . .	163
1-1-Essai de résistance spécifique et variétale à l'égard de <i>S. oryzae</i> L. . .	163
1-2-Evolution des qualités alimentaires et technologiques des blés (blés tendres et blés durs) sous l'effet du ravageur <i>S. oryzae</i> L. . .	163
Annexe 2. : Essai de simulation permettant un conditionnement des grains adapté au protocole expérimental de la deuxième partie expérimentale. . .	167
Annexe 3 : Détermination du facteur de correction permettant de rapporter les mesures du niléalitre, capacité 250 mL à ceux du niléalitre 1L. . .	168

Dédicace

A mon époux ma mère mon père mes enfants Nabil, Hakim et Siham, Souad et Yacine avec toute mon affection pour leur patience et leur compréhension

AVANT-PROPOS

C'est avec un grand plaisir que j'exprime, ici, ma profonde gratitude à monsieur le professeur Z. BOUZNAD qui a accepté la direction de cette thèse et qui m'a soutenue et encouragée tout au long de cette étude.

Je tiens à remercier vivement et particulièrement monsieur F. FLEURAT-LESSARD, qui est à l'origine du thème de cette thèse, pour sa précieuse collaboration, ses conseils judicieux et sa gentillesse illimitée et inégalée. Ce chercheur émérite, de renommée mondiale, de l'INRA de Bordeaux, m'a ouvert la voie de l'immensité des thèmes dans le domaine de la protection des denrées stockées et, plus précisément, de la Protection Antiparasitaire Intégrée à laquelle je suis acquise. Qu'il me soit permis de lui exprimer toute ma reconnaissance et mon profond respect pour les acquis scientifiques qu'il m'a transmis sans compter.

J'adresse mes remerciements respectueux à monsieur le professeur M.M. BELLAL de l'ENSA d'Alger pour l'honneur qu'il m'a fait d'accepter la présidence du jury de cette thèse ; à madame le professeur F. MOUHOUCHE de l'ENSA d'Alger, à monsieur le professeur M. BENMOUSSA de l'Université de Blida et à monsieur le professeur N. SOLTANI de l'Université de Annaba qui ont bien voulu juger ce mémoire et faire partie du jury.

Ma reconnaissance va également à monsieur J.M. SAVOIE, directeur de l'Unité de Recherche INRA-MycSA, pour son accueil bienveillant.

Mes remerciements sont adressés, par ailleurs, à tous les personnels de cette Unité de Recherche, en priorité à B. FUZEAU pour son excellente collaboration technique et son assistance particulièrement efficace tout au long de nos travaux, et, avec une mention particulière, à S. DUPUIS, G. MARCHEGAY, F. TURTAUT et N. MINVIELLE qui ont grandement facilité la réalisation des nombreuses analyses microbiologiques et chromatographiques. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements renouvelés et de mon amitié.

De vifs remerciements sont adressés à madame M. RONZIE, responsable du Laboratoire 'Qualité' des Grands Moulins de Paris à Bordeaux, qui m'a ouvert l'accès de son laboratoire et fait bénéficier de ses conseils, remerciements à partager également avec ses collaborateurs pour leur accueil chaleureux.

Certaines analyses n'auraient pu être réalisées sans la collaboration de l'UMR IATE de Montpellier et du Laboratoire de Pharmacologie et Toxicologie Alimentaire de l'Université Bordeaux II. Nos remerciements sont adressés à J. ABECASSIS, M. CHAURANT, S. MOUKHA et au professeur E.E. CREPPY ainsi qu'à B. BARRIER-GUILLOT, P.-Y. CALLEJON et M. GIROD qui nous ont fourni les lots de grains (variétés pures de blés français) d'Arvalis, Capserval et Champagne céréales, respectivement.

Les échantillons de céréales (blé tendre, blé dur, triticale) de la première partie expérimentale nous ont été fournis gracieusement par les chercheurs de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) d'Alger qui nous ont également permis d'effectuer des analyses dans leurs laboratoires. Qu'ils en soient remerciés, ainsi que de nombreux autres laboratoires qui nous ont ouvert leur porte : OAIC, SAIDAL, hôpital de Blida.

Les travaux de recherche de la seconde partie expérimentale ont été rendus possibles grâce à un soutien financier conjoint des ministères algérien et français de l'enseignement supérieur et de la

recherche qui m'ont fait bénéficier d'une bourse de thèse dans le cadre des accords de coopération franco-algériens.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cette étude trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance.

RESUME

L'étude des déterminants de la sensibilité des espèces et variétés de céréales actuellement cultivées, à l'infestation par les insecte granivores stricts et à des conditions de stockage critiques, a été abordée sous deux angles d'approche différents : a) une analyse comparative de sensibilité du blé dur, du blé tendre et du triticale aux attaques de l'insecte majoritaire des stocks de céréales, *Sitophilus oryzae* L. ; b) une approche systémique de la cinétique de détérioration qualitative du blé panifiable sous l'influence de conditions de conservation à risque modulé et de l'attaque de l'insecte granivore strict.

L'analyse comparative a été réalisée sur céréales produites localement dans les mêmes conditions de culture, afin de caractériser la sensibilité spécifique et variétale chez les trois espèces céréalières aux attaques de *S. oryzae* et d'analyser les interactions entre l'état physico-chimique des grains et la dynamique des populations de l'insecte. Une tolérance relative à l'attaque de *S. oryzae*, lorsque l'humidité relative est basse, a pu être mise en évidence, en particulier avec le blé dur, qui s'est révélé réfractaire à l'infestation dès que la teneur en eau des grains s'abaisse au-dessous de 12%. Lorsque l'humidité relative n'est pas un facteur limitant pour le développement de l'insecte, l'étude comparative a révélé des différences de sensibilité, tant spécifiques que variétales.

La seconde partie a visé à mettre en évidence, par une approche expérimentale « systémique », les interactions entre l'évolution de l'état physico-chimique des grains stockés, l'infestation par *S. oryzae* et l'ensemble des critères qualitatifs déterminant la qualité sanitaire. L'étude multi-critères a été construite à partir de trois variétés de blé tendre cultivées en France couvrant ses principales utilisations industrielles : biscuiterie, pâtisserie et panification. L'évolution des populations d'insectes et des principaux indices et indicateurs de détérioration sanitaire ont été suivis à partir d'échantillonnage périodique sur une durée de stockage de 160 j. L'évolution des caractéristiques rhéologiques des farines extraites a été déterminée par une comparaison des paramètres rhéologiques en début et en fin de stockage. Le critère sanitaire a été approfondi au niveau microbiologique par l'étude cinétique de l'interaction insectes-mycoflore-grain. Les principales variables explicatives liées aux indices de détérioration qualitative, ainsi que leurs interactions, ont pu être extraites par analyse statistique multifactorielle (ACP). Il est ressorti que la plus grande part de la variance des indices caractérisant la cinétique de l'évolution qualitative du blé est dépendante de quatre variables clés : durée de stockage, teneur en eau des grains, densité d'insectes internes aux grains et nombre de propagules par g de grain. Le taux d'accroissement des populations d'insectes, influencé par la variété, s'est révélé corrélé avec la durée de stockage et la teneur en eau, mais pas avec la dureté des grains. Une variété s'est démarquée par sa capacité d'absorption de l'humidité relative (H.R.), notablement plus élevée que celle des deux autres, ce qui a entraîné une infestation et une contamination microbiologique particulièrement élevées en fin de période de stockage. En condition d'H.R. élevée, la capacité germinative a diminué pour toutes les variétés. Le nombre de propagules par g de grain a augmenté d'une façon significative au cours du stockage, alors que le pourcentage de grains contaminés par la flore fongique a régressé dans le temps, montrant que l'évolution du cortège des espèces fongiques reste indépendante des fluctuations observées pour les autres variables. Les autres critères de détérioration qualitative ont été plus lents à évoluer que la capacité germinative qui s'est avérée sensible à l'effet nuisible de la prolifération de la contamination fongique globale. Ce critère de baisse de la capacité germinative a été validé en tant qu'indice précoce d'une détérioration par les espèces fongiques

de la flore « intermédiaire » et de stockage. Au niveau technologique, peu de critères ont varié significativement ou seulement en fin de période de stockage.

L'ensemble des nouveaux éléments de connaissance obtenus devrait être utile pour la construction de stratégies de protection intégrée de la qualité sanitaire des grains au cours du stockage de longue durée, mieux adaptées aux caractéristiques variétales et à leur lieu de culture.

Mots clés : Stockage, céréales, blés, variétés, insectes, mycoflore, indices de détérioration qualitative, analyse multifactorielle

ABSTRACT

A study of the factors related to the susceptibility of cereal species or cultivars to grain insect damage and to seed fungi spoilage during storage was carried out in two ways: a) a comparative analysis of susceptibility of durum, soft wheat and triticale to the attack of stored grain primary pest *Sitophilus oryzae* L.; b) a systemic approach of the kinetics of wheat grain quality traits changes when stored in safe or unsafe condition (insect infestation and high relative humidity (r.h.)).

The comparative analysis was carried out from cereal species produced locally in comparable cropping systems in order to characterize cereal species and cultivar susceptibility to the rice weevil attack at different level of r.h. equilibrium with grain water activity (a_w), and to assess the effect of different a_w levels on *S. oryzae* population rate of increase. A relative tolerance of durum to insect attack was observed below r.h. lower threshold at 68 % (*i.e.* 12% water content). At favorable grain a_w , there was observed a large variability in susceptibility to insect attack and in population dynamics both between cereal species and cultivars.

The objective of the second study was the simultaneous representation of complex interactions between a large set of parameters and indices related to physical-chemical condition of grain, fungi communities, insect population dynamics, and technological criteria for bread making purpose, evolving during a 160-d storage period. This study concerned 3 freshly harvested wheat varieties cultivated in France for different uses: biscuit, pastry or bread making. Insect population rate of increase was followed through sequential sampling of grain batch series: storage in 2 r.h. conditions (75% or 85%) and with or without insect infestation. The rheological characteristics of flour extracted at the end of storage period were compared to those initially measured before storage. The intensity of fungal spoilage was more accurately traced through a specific study of the multiple interaction kinetics between fungi communities, insect abundance and grain quality traits. The key-factors taking a major part of variance of quality traits evolution with storage time were extracted by principal component analysis (PCA). It was shown that the main part of variance of quality indices and traits measured at regular intervals on grain stored in different conditions was related to 4 explanatory variables: storage duration, grain a_w , hidden infestation density, and fungi colony forming units (cfu.g⁻¹) counts. Insect population rate of increase was correlated with storage duration and grain a_w , but not with grain hardness. One cultivar was observed with a higher rate of r.h. absorption, which led to a higher water content level in this variety compared to the two others. Consequently, it was observed a higher fungal spoilage for this variety towards the end of storage period. In high r.h. condition, the germination capacity was progressively reduced for all cultivars. Meanwhile the rate of fungi contaminated seeds decreased along the storage period, cfu.g⁻¹ counts globally increased at the same time. This confirmed that pattern of fungi community changes are independent of storage condition. Among qualitative criteria that significantly evolved during storage, the germination capacity is the more sensitive to critical conditions leading to fungal spoilage. This criterion was used for the calculation of an index of deterioration starting stage and rate. The technological characteristics did not change or at the extreme end of storage period, when insect and fungi are beyond of the worse practical situations.

The new knowledge about the global (ecological) evolution of the stored wheat ecosystem issued from this systemic approach should be useful for the enhancement of modern strategies of

integrated protection of stored grain sanitary quality management when stored for a long period in eventual unsafe conditions.

Keywords: Storage; cereal grain; durum; wheat; triticale; insect; mycoflora; qualitative traits change; multivariate analysis.

ص خلم

من التربة، الكمية المتبقية من المبيدات الحشرية في الحبوب بعد الحصاد تكون أعلى من تلك التي كانت موجودة في الحبوب قبل الحصاد. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية.

تعد الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية.

تعد الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية.

تعد الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية.

تعد الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية.

تعد الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية. وقد لوحظت في بعض الحالات أن الحبوب التي تحتوي على مبيدات حشرية أكثر من تلك التي لم يتم معالجتها بالمبيدات الحشرية أكثر عرضة للإصابة بالأمراض الفطرية.

المصادر:

المصدر: المصطفى العزيم، وزارة الزراعة العراقية، بغداد، العراق، المصطفى العزيم، وزارة الزراعة العراقية، بغداد، العراق.

ABREVIATIONS UTILISEES

- AACC: American Association of Cereal Chemists
- ACP : Analyse en composantes principales.
- ACSAD: Arab Center for the Studies of the Arid zones and Dry lands.
- AFNOR : Association Française de Normalisation.
- AFSSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments.
- AOAC : Association of Official Analytical Chemists.
- AG = A_{GR} : Acidité grasse.
- AU = AC_{UR} : Acide urique.
- A_w : activité de l'eau.
- Cap Germ., CapGE : Capacité germinative.
- CC : Chromatographie sur couche mince.
- CELL : Cellulose.
- CLHP : Chromatographie liquide haute performance.
- CIMMYT : Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- CNCC : Centre National de Contrôle et Certification des semences.
- CPCASA : Comité Permanent de la Chaîne Alimentaire et de la Santé Animale.
- CRIAA : Centre de Recherche des Industries Agro-alimentaires.
- CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.
- DD : Durée de développement des insectes.
- DL 50 : Dose létale 50 %.
- DON : Désoxynivalénone (Trichotécènes)
- DUROM : Dureté.
- OTA : Ochratoxine A.
- EFF : Effectif d'insectes.
- ERGO : Ergostérol.
- FAO : Food Agriculture Organisation.
- GBPH : Guide de Bonnes Pratiques d'Hygiène
- GIR : Gestion intégrée des ravageurs.
- GrCONT = '*GrainCO*': % grains contaminés par la mycoflore.
- HACCP : Hasard Analysis Critical Control Point.
- ' H_2O ' : Teneur en eau.
- HR : Humidité relative.
- HRE : humidité relative d'équilibre.
- IANOR : Institut Algérien de Normalisation.
- ICARDA : International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
- IJ, IB : Indices de coloration du blé dur.
- Indi_Hagberg = HAGB = IC : Indice de chute.

- INPV : Inst.Nat. de la Protection des Végétaux.
- INRA : Inst. Nat. de la Recherche Agronomique.
- 'InsAD' = *Ins_AD* : Insectes adultes.
- 'InsFC' = *Ins_FC* : Insectes formes cachés.
- IS : Indice de sensibilité.
- ISTA : Assoc. Intern. d'Essais de Semence.
- ITCF : Inst. Techn.des Céréales et des Fourrages.
- ITGC : Institut Technique des Grandes Cultures.
- J.O. : Journal Officiel.
- LMR : Limite Maximale de Résidus tolérée.
- MA : Ministère de l'Agriculture.
- MADR : MA et du Développement Rural.
- MIPI : Ministère de l'Industrie et de la Promotion des Investissements.
- 'MycoQ' = *Myc_QU* = *Fungi_Q* : Nombre germes/g.
- MycSA : Mycologie et Sécurité des Aliments.
- 'NA' : Norme algérienne, 'NF' : Norme Française.
- OAIC : Office Algérien Interprofessionnelle des Céréales et des légumes secs.
- OAIC / DSAP : OAIC / Direction des semences et de l'appui technique.
- o.m. : ouverture de maille.
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé.
- OS : Organisme stockeur.
- PAI : Protection antiparasitaire intégrée.
- PH₃ : Phosphine.
- PMG : Poids de 1000 grains.
- PNDA : Plan national de développement agricole.
- PPG : Pertes globales en poids.
- PREAR : Programme du Renouveau de l'Economie Agricole et Rurale.
- *PROT* : Protéines.
- 'PS' : 'Poids spécifique' ou masse à l'hectolitre.
- SAD : Système informatisé d'Aide à la Décision.
- SAIDAL : Société Algérienne de production de médicaments.

INTRODUCTION GENERALE

Les céréales constituent la ration alimentaire de base de tous les algériens et leur disponibilité est un facteur de stabilité sociale et politique prépondérant.

Des programmes gouvernementaux multiples et successifs ont été mis au point par les pouvoirs publics pour élever la production parmi lesquels peuvent être cités les plus récents : le plan national de développement agricole (PNDA) et le programme du renouveau de l'économie agricole et rurale (PREAR, 2009-2014). Ce dernier vise, entre autres, à assurer la sécurité alimentaire du pays par l'augmentation de la production nationale des produits de large consommation et l'amélioration de la qualité. L'objectif est de réduire la dépendance extérieure tout en favorisant un développement durable et la garantie des revenus aux producteurs. Il est à signaler que les céréales représentent un des principaux produits qui influent sur la facture alimentaire en affichant un niveau de couverture de 30% (MIPI, 2010). En effet, la production céréalière reste encore insuffisante bien qu'une amélioration sensible a été constatée ces dernières années : 60,1 millions de qx en 2009, plus de 52 millions de qx en 2012 (estimation), les décennies antérieures à l'an 2000 ayant produit en moyenne 17 à 25 millions de qx.

La filière 'céréales' a toujours revêtu une importance stratégique dans l'économie de l'Algérie et les céréales et dérivés ont représenté, aussi bien en volume qu'en valeur, la part la plus importante dans :

- La production agricole nationale
- Les importations agro-alimentaires
- La transformation des céréales
- La ration alimentaire des algériens

Pour assurer la sécurité alimentaire nationale, il est donc nécessaire d'une part d'augmenter substantiellement les rendements et, d'autre part, de renforcer les capacités et moyens de stockage qui doivent être adaptés et équipés pour un contrôle continu des conditions d'entreposage (humidité relative (HR) et température du grain).

Au niveau mondial, l'augmentation des rendements est obtenu, en partie, grâce aux travaux de sélection qui consistent essentiellement à recueillir ou à créer des populations à large base génétique puis à sélectionner c'est-à-dire à identifier, stabiliser et multiplier les meilleurs génotypes de cette population. Plus particulièrement, la sélection variétale du blé a eu comme objectif majeur l'obtention de variétés résistantes aux maladies courantes (maladies dues à des champignons phytopathogènes et/ou mycotoxinogènes pour l'essentiel) mais surtout l'augmentation des rendements (Bushuk, 1984) et l'amélioration de la qualité technologique (Rousset, 2000).

En Algérie, pour le Centre National de Contrôle et Certification des semences (CNCC) chargé de réaliser les tests d'homologation des variétés de céréales en vue de leur inscription dans le catalogue officiel, les objectifs à atteindre pour les blés sont représentés par la productivité, la régularité des rendements et la qualité des grains pour les usages agro-alimentaires de base. Ce dernier aspect, déterminé à partir de caractéristiques technologiques (masse de 1000 grains, taux de cendres, teneur en azote total et en gluten, test de Zélény, alvéographie, temps de chute, indices de coloration des blés durs, test de

panification à échelle réduite, test de fabrication et de cuisson de pâtes alimentaires) n'est cependant évalué que dans les dernières étapes de la sélection où les quantités de grains récoltés sont suffisantes. Cependant, dans le monde, d'autres critères sont utilisés pour la sélection en rapport avec la qualité intrinsèque des protéines de la variété. En France, par exemple, les analyses pour la sélection des blés sont orientées à partir des techniques biochimiques d'électrophorèse des protéines (Doussinault, 1983 ; Autran et Morel, 1997) : à partir d'un grain et donc à partir des premières étapes de la sélection où le nombre de lignées et donc la variabilité génétique sont les plus élevés, l'analyse électrophorétique des protéines, gliadines ou gluténines, permet de d'évaluer ou de prédire simplement et précisément la qualité technologique intrinsèque des blés. Cet aspect, très important pour une sélection efficiente des blés, n'est pas encore appliqué par les organismes officiels d'homologation en Algérie bien que de nombreux chercheurs nationaux s'intéressent à la question (Abdelguerfi et Laouar, 2000 ; Benarioua *et al.*, 2000 ; Cherdouh *et al.*, 2000 ; Tlili-Ait Kaki *et al.*, 2000). L'analyse électrophorétique permet en outre d'identifier les variétés de céréales, ce qui est primordial pour le CNCC.

A côté de l'effort considérable réalisé pour la sélection d'une meilleure valeur technologique, très peu de recherches ont été faites pour obtenir des grains moins sensibles aux infestations par les insectes et, pratiquement, rien n'a été tenté sur le blé pour l'introduction d'un caractère de résistance par rétrocroisement dans les variétés présentant des caractéristiques agronomiques et technologiques satisfaisantes. Il existe pourtant des

variétés présentant certaines caractéristiques qui les rendent plus tolérantes aux déprédateurs et aux « agresseurs » saprophytiques (Moreno Martinez et Christensen *In* Multon, 1982).

Les pertes causées par les insectes ravageurs des stocks (charançons, capucin, alucite,...) sont importantes en région méditerranéenne. Du fait des difficultés liées à l'évaluation des pertes subies par les récoltes pendant la période de stockage, celles-ci sont estimées, d'une façon réservée, à 10 % des récoltes de denrées facilement conservables (grains, graines, fruits secs, tubercules...) par les organismes internationaux de l'harmonisation des programmes d'assistance aux pays en voie de développement (Multon, 1982). Elles sont dues à différents agents tels que les facteurs physiques et / ou biologiques de détérioration. En réalité, les pertes dans les pays en voie de développement doivent dépasser ce pourcentage. Dans quelques pays d'Afrique et d'Amérique latine, les pertes peuvent dépasser 50 % des quantités récoltées (FAO, 2002) et peuvent même atteindre 75 % des grains stockés dans quelques pays en voie de développement (Campbell *et al.*, 2000) . En Algérie, les dégâts provoqués seulement par les insectes sur les céréales stockées ne sont pas loin d'atteindre et même de dépasser 20 % de pertes : entre 20 % et 25 % selon les années (INPV, 1981). Ce pourcentage est loin de la réalité car d'autres agents d'altération sont présents sur les lieux d'entreposage et peuvent donc entraîner des pertes non-évaluées. Il s'agit des microorganismes, des acariens, des oiseaux et des rongeurs. Ces pertes pondérales peuvent également être qualitatives ; celles-ci, sanctionnées par une réduction de la valeur commerciale, peuvent être quantifiées lorsque les critères de qualité ont été préalablement établis : conditions physiques des grains, valeur alimentaire, faculté germinative, qualité technologique. Peu d'études ont été faites pour estimer ou évaluer ce type de dommage, d'ordre qualitatif, certainement à forte incidence économique dans un marché concurrentiel qui se resserre de plus en plus au niveau international du point de vue des exigences de qualité.

Il est à souligner que ces pertes peuvent survenir non seulement au niveau du stockage mais pratiquement à n'importe quelle étape de la production, lors de la récolte, du transport

et de la manutention. Ainsi, des pertes au niveau agronomique, généralement non évaluées, existent (en liaison avec les performances de la variété, le type de semence, l'itinéraire technique, les ennemis des cultures, la sur-maturité, le réglage du matériel de récolte), ces dommages étant aggravés par des pertes lors du transport, de la manutention et du stockage. Chaque année, les coûts estimés des pertes des grains dues aux dommages des

insectes, champignons et mycotoxines atteignent 15 milliards de boisseaux de grains stockés dans le monde (soit environ 375 millions de tonnes), correspondant à 500 millions de dollars (Harein et Meronuck, 1995 *In* Campbell et al., 2000) jusqu'à 1 milliard de dollars (Cuperus, 1995 *In* Campbell et al., 2000).

En matière de protection intégrée des stocks de céréales en post-récolte contre les ravageurs, la sensibilité variétale aux insectes n'a jamais été prise en compte dans les processus de sélection. Pourtant, les avantages que pourraient procurer l'utilisation de variétés plus tolérantes aux mauvaises conditions de conservation et, en particulier aux attaques d'insectes ravageurs primaires, sont en cohérence avec les principes et dispositions nouvelles sur la protection de l'environnement, la réduction des usages des pesticides, ainsi que des pertes avant et après récolte. Dans les cultivars performants sélectionnés pour l'obtention de rendements maximum dans un système cultural intensif, il a été signalé une sensibilité aux bio agressions en augmentation, quelques cultivars ayant perdu une part des gènes responsables de l'aptitude de protection contre les ravageurs animaux (Gallo, 2007).

L'utilisation de variétés plus tolérantes aux attaques d'insectes est compatible avec les méthodes de gestion intégrée des ravageurs (GIR) après récolte qui sont préconisées aujourd'hui de par le monde. Actuellement, la connaissance de la sensibilité des variétés cultivées pour leur tolérance aux attaques de ravageurs post récolte est pratiquement inexistante. Il y a un besoin de connaissances objectives sur le domaine, tant pour la méthodologie de la recherche expérimentale à réaliser que sur l'actualisation des résultats dans un contexte géographique et agronomique particulier comme l'Algérie. Ces données nous semblent indispensables pour faire progresser les bonnes pratiques de gestion intégrée de l'état sanitaire et des qualités technologiques des céréales en post récolte.

Nous avons donc envisagé, dans le cadre d'un programme de recherches, d'aborder ce thème en l'orientant vers le modèle d'insecte *Sitophilus oryzae* (L). Cette espèce primaire à formes cachées est classée la plus nuisible à l'ensemble de la production céréalière mondiale (Champ et Dyte, 1976). En Algérie, également, elle est classée en première position du point de vue nuisibilité par l'INPV (1976). Nous avons donc prévu plusieurs études pour tenter d'obtenir des informations aussi complètes que possible relatives au comportement et au devenir de céréales en grains infestées et stockées dans différentes conditions d'humidité relative tout en nous intéressant plus particulièrement aux blés.

Plusieurs problématiques complémentaires ont été explorées :

- La sensibilité spécifique et variétale des céréales aux attaques du ravageur primaire de stockage *Sitophilus oryzae* est-elle suffisamment variable pour pouvoir être un levier utile pour une gestion de la protection des grains après-récolte économe en pesticides ?
- Des effets technologiques et sanitaires néfastes induits par le développement de ce dangereux déprédateur peuvent-ils être modélisés en établissant la relation entre l'infestation et la perte de ces qualités par détermination des critères d'évaluation en usage courant ?

- Les variétés de blé performantes (au niveau du champ et de la transformation) sont-elles aptes à tolérer des conditions environnementales critiques (HR élevée, risques de détériorations dues à l'infestation par les insectes et/ou l'infection par les champignons) ?

Ces différents aspects n'ayant pas, jusqu'à présent, fait l'objet d'étude complète des aspects entomologiques et mycologiques associés aux effets technologiques et sanitaires, cette étude, par une approche « systémique », représente un travail qui nous semble pertinent, au moins au plan méthodologique.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I -Données sur les céréales transformées en Algérie.

1.1-Importance économique de la production locale et des importations de céréales.

Une des questions les plus préoccupantes pour notre pays est la sécurité alimentaire qui peut être atteinte par le développement de l'agriculture en général mais plus précisément de la céréaliculture.

Depuis l'indépendance, la céréaliculture nationale est pratiquée sur l'ensemble de l'espace agricole sans prendre en considération les vocations naturelles des terroirs. De caractère essentiellement pluvial, cette céréaliculture se caractérisait par une conduite extensive aggravée par la pratique de techniques culturales inappropriées d'où production basse mais surtout, dégradation des écosystèmes déjà fragiles, accentuant ainsi le phénomène de désertification.

A partir de l'an 2000, pour rompre avec une pratique céréalière qui a montré ses limites, le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR) a engagé une démarche visant à traiter de manière différenciée les espaces céréaliers tout en optant pour une gestion active de la sécheresse. Cette démarche consiste en une intensification de la production céréalière au niveau des zones favorables d'une part et en une adaptation progressive des systèmes de production aux potentialités et aux vocations naturelles des zones de production, d'autre part. Le système vise à limiter la pratique de la céréaliculture au niveau de la zone défavorable tout en la remplaçant par d'autres spéculations plus adaptées. Cette option stratégique s'inscrit dans la logique d'un développement durable, d'amélioration de la sécurité alimentaire, de protection des ressources naturelles et de garantie des revenus des agriculteurs (Ministère de l'Agriculture MA, 2001).

1.1.1-Productions et Rendements.

En relation avec le caractère pluvial de la culture, les principales céréales cultivées en Algérie sont des céréales d'hiver : blés durs et tendres (*T. durum* Desf. et *Triticum aestivum* L. respectivement), orge (*Hordeum vulgare* L.) et, à un degré moindre, avoine (*Avena sativa* L.). Les céréales d'été, maïs et sorgho, nécessitant l'irrigation, sont peu cultivées. Cependant, cette dernière céréale donne lieu à des exportations à partir des régions sahariennes (MIPI, 2010). Le blé dur représente la céréale la plus cultivée

localement du fait de la demande et de la consommation extrêmement forte des dérivés (semoules, couscous, pâtes alimentaires, gâteaux,...) et de son prix élevé, au niveau mondial, sa production et son utilisation y étant restreintes (pâtes alimentaires, essentiellement).

L'irrégularité de la production céréalière d'une décennie à l'autre et d'une campagne à l'autre ressort du tableau 1 suite au climat local « capricieux » qui entraîne des précipitations irrégulières dans le temps et l'espace. Il montre également l'évolution positive de la

production céréalière dans le temps, plus particulièrement celle de 2008-2009 par rapport à 2007-2008, égale à 253 %. A titre de comparaison, les rendements moyens, toutes espèces confondues, obtenus en 2009 a été de 16,3 qx/ha et, durant les périodes 1972 /89 et 1990 /2008, de 8,9 qx/ha et 12,7 qx/ha respectivement (Merouani *et al.*, 2010). Dans le temps, le rendement s'est donc élevé régulièrement jusqu'à dépasser 16 qx/ha avec des pics atteignant 40 et 60 qx/ha. Ceci montre que le programme d'intensification céréalière mis au point par le MADR [programme (2009-2014), du Renouveau de l'Economie Agricole et Rurale (REAR) (MADR, 2009)] commence à donner des « fruits » ce qui encourage la persévérance dans cette voie.

La production locale de blé ne couvre que 30 à 40 % des besoins nationaux (MIPI, 2010), les besoins annuels de consommation de la population se situant autour de 70 millions qx de céréales (MADR, 2009).

Le triticale (*Triticosecale* Wittmark), auquel nous nous intéressons pour ses qualités agronomiques et alimentaires, n'est plus ou peu cultivé depuis l'an 2000 ; il constitue, cependant, une céréale particulièrement adaptée à l'alimentation du bétail à promouvoir et à améliorer. Le programme du REAR a prévu la résorption de la jachère où, suivant les potentialités de la zone, le triticale sera cultivé, pur ou en association avec des légumineuses (MADR, 2009).

Espèces	Moy. 1999/2000*	Moy. 2008/2009**	Campagne 2007/2008 **	Campagne 2008/2009 **
Blé dur	10 980 000	10 848 848	8 890 000	24 907 140
Blé tendre	4 590 000	8 348 813	3 437 000	11 388 230
Orge	7 789 000	11 409 489	3 879 000	24 062 240
Avoine	848 000	792 847	840 000	1 489 480
Total	23 432 000	32 099 279	17 000 000	61 227 090

Tableau 1 : Production/espèce suivant 2 campagnes et 2 décennies céréalières (qx)
(MA, 2001*; MADR, 2011**)

1.1.2-Importations.

Celles-ci concernent essentiellement le blé tendre dont la production est insuffisante par rapport aux besoins nationaux et, dans une moindre mesure, le blé dur. Du maïs est également importé, essentiellement pour l'alimentation animale, par l'Office National des Aliments du Bétail mais également par divers opérateurs privés.

Les transactions des blés importées sont réalisées sur la base de cahiers de charge précis relatifs aux caractéristiques physico-chimiques, technologiques et sanitaires ; le but est d'assurer une qualité acceptable à la transformation et à la consommation. C'est ainsi que les caractéristiques alimentaires des blés (protéines, teneur en eau, impuretés, mycotoxines, radioactivité) et leurs aptitudes technologiques (« PS », indice de chute, W et P/L, Zélény, mitadinage,...) (ITCF, 2001) sont l'objet de spécifications réglementaires. En présence de toutes les parties, des contrôles contradictoires sont effectués à l'embarquement des grains en ce qui concerne le poids et la qualité, par référence au cahier des charges, le débarquement ne pouvant avoir lieu qu'après établissement d'un procès verbal d'admission en Algérie et du certificat de conformité (OAIC, Direction Commerce extérieur, *Comm. Pers.*, 2011).

En Algérie, la conservation des grains, produits localement ou importés, est un objectif national. Leur entreposage et leur protection pour une stabilité dans le temps nécessitent

des moyens colossaux financiers, matériels et humains que les pouvoirs publics déploient tout au long de la filière (Merouani *et al.*, 2010). Les déprédateurs des stocks peuvent rendre les grains non « sains, loyaux et marchands » lorsque les moyens de stockage et de conservation sont défectueux et / ou inappropriés. Dans le cas des blés, la qualité industrielle, qui est un aspect qualitatif particulièrement important pour la transformation, peut être amoindrie particulièrement lorsque la force boulangère ou la valeur pastière des variétés est initialement faible (Fourar, 1994). Au niveau national, il est avancé que la création variétale repose sur la productivité, la régularité des rendements et la qualité technologique. Cependant, la gamme céréalière disponible est-elle suffisamment diversifiée ? C'est ce que nous allons voir ci-après.

1.2-Variétés disponibles en Algérie.

L'amélioration variétale des céréales connaît une attention particulière en Algérie, l'objectif étant l'obtention de variétés à haut potentiel productif, adaptées aux différentes zones agro-écologiques, tolérantes aux principales maladies, à paille de hauteur moyenne et présentant une bonne qualité technologique (Projet Céréales, 1974 ; ITGC, 1991 ; Boufenar-Zhagouane et Zhagouane, 2006 ; CNCC, 2009). Dans ce but, le matériel génétique utilisé pour les espèces blés, orge et avoine est constitué de matériel végétal issu des centres internationaux ICARDA, CIMMYT, ACSAD ou de la coopération bilatérale avec divers pays (Boufenar-Zhagouane et Zhagouane, 2006).

La gamme des variétés céréalières homologuées a évolué ces dernières années pour comprendre actuellement 112 variétés, toutes espèces confondues, le blé dur comptant 37 variétés, le blé tendre 29, l'orge 23, l'avoine 11 et le triticale 12. Cependant, le nombre de variétés en production dans le cadre du programme de semences de céréales est limité à 29 en 2010 (26%) et 31 en 2011 (27,7%) (OAIC / DSAP, 2011). En outre, pour chaque espèce, quelques variétés ont la préférence des producteurs bien que, d'autres variétés, parfois plus performantes et adaptées aux conditions du milieu, sont disponibles. D'une façon générale, les variétés locales, mieux connues, sont plus appréciées alors que la demande pour le triticale est inexistante : la vulgarisation et des essais de démonstration doivent être effectués à grande échelle pour une meilleure connaissance des variétés homologuées permettant aux producteurs un choix rationnel dans une gamme variétale étendue.

De ce premier chapitre, il ressort que les céréales commercialisées en Algérie, et plus particulièrement les blés, se composent de variétés locales de l'année renforcées, quantitativement, par des lots de grains importés, préalablement stockés dans le pays d'origine. Ces derniers présentent, par là-même, un « passé » où des traitements divers (physiques, chimiques) ont pu être effectués en vue de leur conservation. Ils peuvent donc contenir des bioagresseurs non détectables à l'œil nu et/ou des contaminants. Le stockage à moyen ou court terme de ces grains, seuls ou en mélange, peut entraîner la détérioration de leur qualité sanitaire, alimentaire et technologique particulièrement si l'état initial des grains est médiocre et/ou les conditions et les moyens de stockage sont inadaptés.

II -Paramètres influant sur l'aptitude au stockage et l'état sanitaire des grains.

La qualité des céréales collectées se construit à partir de la semence jusqu'à la récolte, les conditions de culture et l'itinéraire technique jouant un rôle primordial dans l'obtention de grains vigoureux, de qualité alimentaire et technologique élevées (Côme, 1982 ; Multon, 1982 ; Martin, 1990 ; Tipples, 1995 ; Kleiber *et al.*, 2001 ; Roussel, 2003 ; Rousset, 2003 ; Laconde, 2003 ; Leenhardi *et al.*, 2004 ; Abdellaoui et Mariche, 2008 a, 2008 b). Ils seront alors aptes au stockage en vue de la conservation (Cahagnier, 1989). Pour obtenir puis préserver cet état initial, la démarche qualité consiste à prendre en considération les points critiques se situant au niveau de la production puis du stockage.

2-1-Au champ.

Au cours du développement de la culture, des mauvaises herbes vont pousser et fructifier, des maladies peuvent survenir ainsi que des déprédations diverses qui vont nécessiter des traitements et entraîner, dans les céréales récoltées, la présence de certaines impuretés, de bioagresseurs et de contaminants (ITCF, 2001 ; Boucon, 2004) ; ceci va constituer un risque pour la conservation des grains et leur consommation.

Sachant que, dans un lot de céréales, une impureté correspond à tout ce qui n'est pas grain sain de l'espèce, certaines vont constituer une source d'infestation, d'infection ou d'intoxication : matières inertes, grains verts, grains cassés, grains prégermés, grains punaisés, grains fusariés, grains cariés ou boutés, ergot, graines nuisibles toxiques (Steffan, 1978 ; Donnelly, 1979 ; Fourar et Fleurat-Lessard, 1997 ; Tipples, 1995 ; ITCF, 2001). Par ailleurs, à la récolte, le grain est normalement accompagné d'une flore microbienne à caractère xérophile appartenant à de très nombreux genres de bactéries (plusieurs millions/g pour des céréales fraîchement récoltées), de levures et de champignons (quelques dizaines de milliers/g), le taux de contamination étant fonction de la teneur en eau des grains et des facteurs écologiques au moment de la moisson (AFNOR, 1982). Contaminés par des souches mycologiques toxigènes, les grains récoltés peuvent contenir des mycotoxines (cas des grains fusariés) mais également des résidus de pesticides suite à la lutte chimique menée contre les ennemis des cultures (Fleurat-Lessard, 2003 a) ; celle-ci reste, cependant, un moyen incontournable pour l'obtention de rendements et qualité acceptables.

2.2-Au cours du stockage

Le regroupement des récoltes sous forme de stock crée un écosystème artificiel (fig. 1). Ce dernier, facilement altérable, présente des conditions de milieu et une communauté particulière d'êtres vivants (Cangardel, 1978 ; Multon, 1982 ; Tipples, 1995).

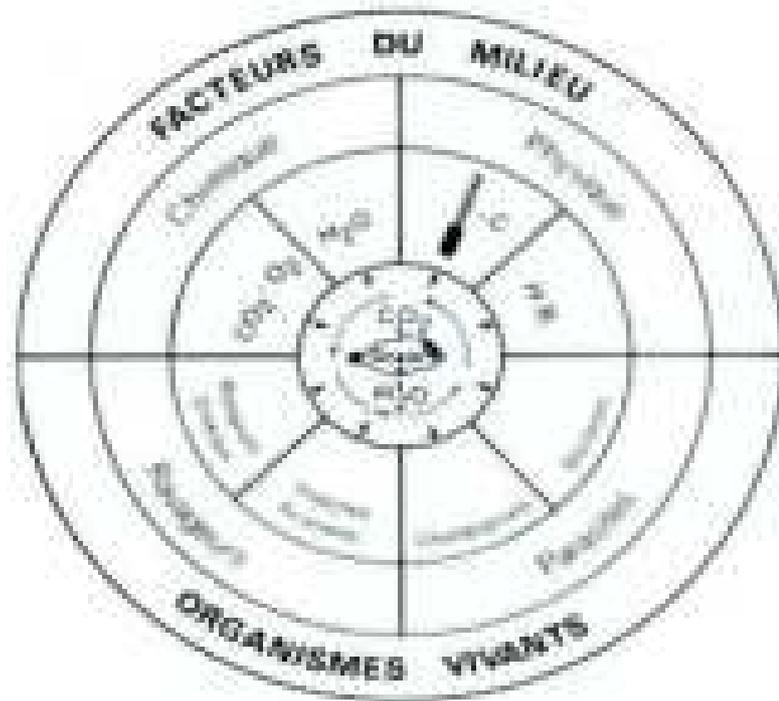


Figure 1 : Ecosystème d'un grain stocké (Cangardel, 1978).

Cet écosystème dépend des :

2.2.1-Conditions de stockage

(température, humidité relative, composition de l'atmosphère intergranulaire, durée de stockage) qui vont entraîner des interactions complexes entre variables abiotiques et composants de l'écosystème du grain stocké (grains, impuretés, bioagresseurs) (Tipples, 1995).

2.2.2-Facteurs de détérioration au cours du stockage

Ils correspondent à des facteurs physiques et/ou biologiques.

- **Facteurs physiques.** Ces facteurs, essentiels pour la biologie du grain et des bioagresseurs, vont influencer sur leur métabolisme et l'évolution des caractéristiques alimentaires, technologiques et commerciales des grains (Tipples, 1995). Il s'agit de :
 - L'humidité relative (HR) de l'air ambiant.

C'est un facteur particulièrement important qui influe directement sur la teneur en eau du grain, celui-ci étant hygroscopique. Suivant l'HR de l'air ambiant, les grains vont s'humidifier ou s'assécher jusqu'à atteindre une humidité relative d'équilibre (HRE) (Jemmali, 1971 ; Multon, 1982). L'hygroscopicité se mesure, à une température donnée, par une courbe isotherme de sorption, d'allure sigmoïde (fig. 2). L'HRE est parfois exprimée en terme d'activité de l'eau, A_w .

$$A_w = HR / 100.$$

Un grain sec est à l'état de vie ralentie, son métabolisme s'élevant au fur et à mesure que sa teneur en eau augmente. Le processus de germination peut s'enclencher et il devient alors un milieu propice aux altérations d'ordre chimique, enzymatique et biologique (Petit,

1969). A une température de 20°C, les risques d'altération d'un lot de blé sont élevés lorsque la teneur en eau des grains dépasse 13% (Fig. 2) (Multon, 1982 ; Tipples, 1995).

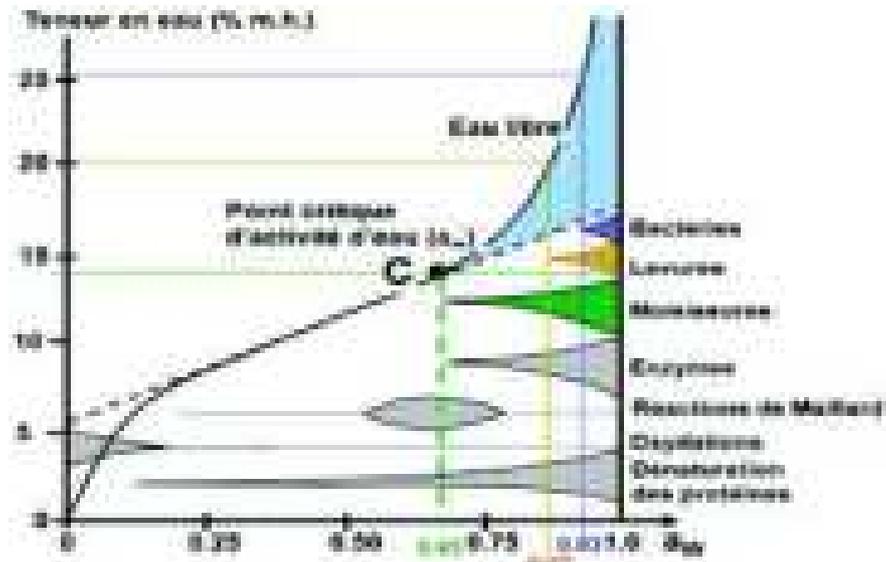


Figure 2 : Courbe de désorption du blé, vers 20°C, montrant les zones d'action du facteur « Activité de l'eau » sur les principales causes d'altération (D'après Multon, 1982).

- La température qui intervient sur pratiquement toutes les réactions selon une loi exponentielle d'où son extrême importance (AFNOR, 1982).

L'élévation de ce facteur peut être naturelle (résultat des phénomènes de respiration ou de fermentation) ou intentionnelle (séchage). En général, cette élévation,

- Accroît, dans le grain, l'agitation moléculaire et la vitesse des réactions chimiques de dégradation : réaction de Maillard, dénaturation des protéines et des acides nucléiques, modifications physicochimiques de l'amidon, destruction des vitamines, oxydations non enzymatiques des lipides et des acides gras insaturés (Petit, 1969 ; Tipples, 1995).
- Favorise, au départ, le développement des déprédateurs et les réactions biologiques, en relation avec la teneur en eau des grains, puis l'autodestruction des grains et des bioagresseurs lorsque la température dépasse 40° C (Steffan, 1981).
- La composition de l'atmosphère inter granulaire.

Celle-ci agit sur la nature du métabolisme (aérobie ou anaérobie) du grain et des déprédateurs.

- Le temps.

Le facteur temps introduit la notion de vitesse de réaction qui dépend essentiellement de la température, de l'H.R. de l'air ambiant et de la composition de l'atmosphère inter granulaire. Ainsi, plus les conditions du milieu seront favorables aux altérations biochimiques et biologiques, plus grande sera la vitesse de réaction conduisant à la détérioration des grains stockés. Pour estimer une durée probable maximale de conservation, il faut se référer aux moyens de stockage et de conservation existants, à l'état sanitaire initial des grains et à leur utilisation ultérieure (semence, alimentation humaine ou animale) (Multon, 1982).

- **Facteurs biologiques** : Il s'agit du métabolisme élevé du grain conjugué à celui des déprédateurs, ces derniers étant représentés par les champignons des milieux peu hydratés, les acariens, les insectes, les oiseaux et les rongeurs (Fleurat-Lessard, 1978 ; Grolleau et Gramet, 1982 ; Fleurat-Lessard, 1990 ; Tipples, 1995 ; Cahagnier et Fleurat-Lessard, 1996). Ces bioagresseurs sont extrêmement dangereux car leur multiplication entraîne la décomposition du milieu dans lequel ils vivent, la production de substances dangereuses dans les grains (enzymes, mycotoxines, acide urique, acide guanine) (Sharma *et al.*, 1979 ; Fleurat-Lessard, 1990) ainsi que l'échauffement et l'humidification progressifs du milieu (Cangardel, 1978 ; Tipples, 1995).

2.2.3-Moyens de stockage

Le mode de stockage du grain (en sac ou en vrac, aérien ou souterrain), les caractéristiques du conditionnement (nature du matériau, capacité de stockage, moyens de contrôle des facteurs température et HR) ont une importance primordiale sur la conservation des grains (Multon, 1982). Le stockage peut être réalisé :

- En atmosphère renouvelée ou en anaérobiose
- Dans des silos (métalliques ou béton) ou des hangars.

Le choix des moyens de stockage est fonction du degré d'évolution technique du pays mais également des moyens financiers disponibles, de la masse de grains manipulés, de leur utilisation ultérieure et de la durée de stockage (stockage à court, moyen ou long terme) (AFNOR, 1982 a).

En Algérie, le stockage des céréales est en atmosphère renouvelée, dans des silos souvent métalliques mais également en béton et, lorsque les capacités de stockage deviennent insuffisantes, dans des hangars où les risques de bio agression sont élevés.

2.2.4-Moyens de conservation

Au niveau mondial, la lutte contre les ravageurs des stocks est une bataille dont les enjeux sont importants au niveau économique, social et environnemental. Le choix du type de lutte à appliquer doit se faire sur la base (AFNOR, 1982 a ; FAO, 1984; Horber, 1983 ; Tipples, 1995 ; Cahagnier et Fleurat-Lessard, 1996 ; Ndiaye *et al.*, 1998 ; Fleurat-Lessard, 2007) :

- De la denrée à protéger
- De son état initial
- Des moyens de stockage
- Des moyens de conservation disponibles
- De l'utilisation ultérieure
- Des exigences sur la qualité sanitaire.

On distingue :

2.2.5-Les techniques de stabilisation,

méthodes de lutte physiques essentiellement passives intervenant au niveau des facteurs du milieu : prénettoyage, séchage, transilage, ventilation, refroidissement des grains, stockage en anaérobiose (Multon, 1982).

2.2.5.1-Les techniques pour le contrôle de l'infestation et du développement des déprédateurs.

En cours de stockage, le moyen de lutte le plus couramment utilisé est la lutte chimique car cette technique a de multiples applications : protection préventive des cellules vides, traitement direct du grain et fumigation, traitement d'assurance de désinsectisation totale sans résidus en cas d'infestation visible (Phosphine : PH_3) (Fleurat-Lessard, 2007). Dans le

monde, les industries agroalimentaires ont de nouvelles exigences suite à une prise de conscience plus grande du consommateur de l'aspect sanitaire des denrées alimentaires.

D'après la même source, la lutte physique présente actuellement un nouvel intérêt du fait :

- De la révision de l'homologation de plusieurs insecticides et de l'interdiction de certains (dichlorvos, bromure de méthyle).
- De l'interdiction d'utiliser les insecticides de contact sur les produits pulvérulents (farine, semoules) d'où la nécessité d'appliquer un fumigant ou une méthode de lutte physique active ou passive.

2.2.6-Spécificités et caractéristiques des grains influant sur la conservation.

Celles-ci, relatives à l'espèce, la variété, la maturité, la composition biochimique, l'intégrité et l'état sanitaire des grains, ont un effet prépondérant sur l'aptitude des grains au stockage. En effet, il existe des espèces et variétés qui présentent, par le biais des structures protectrices et des caractéristiques physico-chimiques de l'endosperme (maturité, intégrité, taille des grains, dureté, vitrosité de l'amande, masse de 1000 grains, masse à l'hectolitre, épaisseur et dureté du péricarpe, teneur en protéines, en cellulose) une résistance appréciable aux chocs et une meilleure tenue face aux déprédateurs (Dobie, 1974 ; Cogburn, 1977 ; Steffan, 1978 ; Nawrot, 1981 ; Moreno-Martinez et Christensen *In* : Multon, 1982 ; Multon, 1982 ; Cogburn, *et al.*, 1980, 1983 ; Philogène *et al.*, 1988 ; Haryadi, 1991 ; Fourar, 1994 ; Toews *et al.*, 2000 ; Campbell, 2002 ; Nawrot *et al.*, 2006). L'absence d'effet de la composition biochimique sur le taux d'émergence des adultes (ou le taux de développement juvénile complet) d'espèces du genre *Sitophilus* a été montré récemment par Tongjura *et al.* (2010) dans une étude comparative de la sensibilité de variétés de maïs à grains de taille et de composition biochimiques différentes, vis-à-vis de *Sitophilus zeamais* Motsch. Dans ces conditions, l'influence de la variété sur l'aptitude à la longue conservation des grains après récolte ne semble pas découler d'un phénomène de résistance, mais peut moduler la tolérance de la graine.

Une batterie impressionnante de moyens de conservation est déployée pour protéger les grains stockés des innombrables facteurs de détérioration suite à leur composition biochimique particulièrement intéressante pour l'alimentation humaine et animale.

2.3-Structure et composition des grains de céréales.

Le grain de céréales est un organisme vivant, structuré et de composition de haute valeur nutritionnelle pour l'homme mais, également, pour une multitude de déprédateurs.

2.3.1-Structure

Le grain constitue le fruit de la plante ; c'est un caryopse qui comprend trois parties aux fonctions bien précises (Fig. 3) :

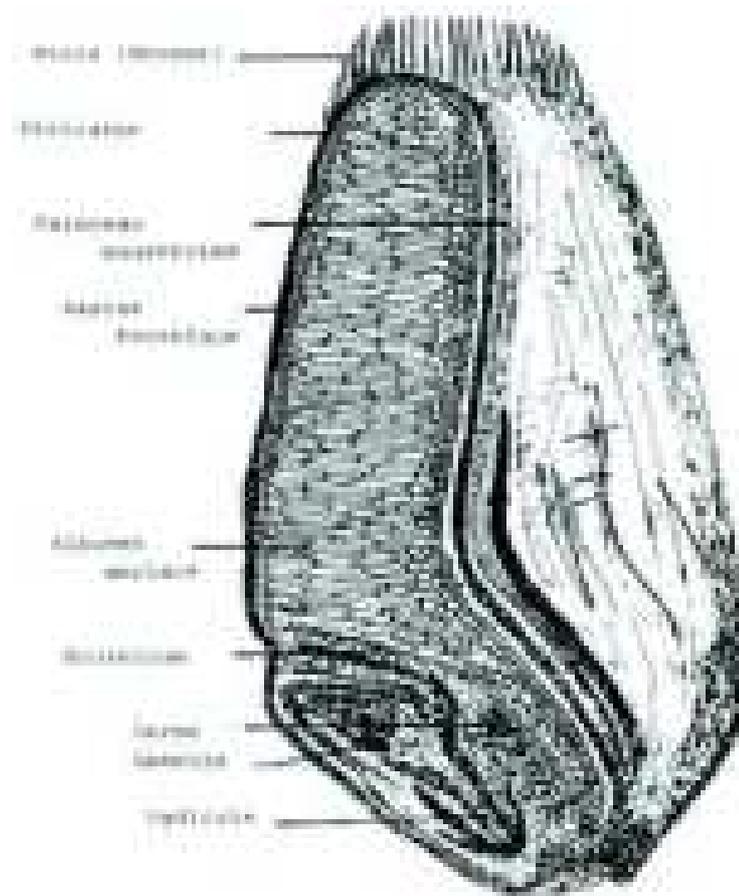


Figure 3 : Coupe longitudinale d'un grain de blé (grossissement 20) d'après Fleckinger ((1935)

- Le germe : Il est responsable de la perpétuation de la vie. De par sa richesse en nutriments (vitamines, protides, lipides, glucides,...), il est particulièrement intéressant du point de vue nutritionnel (Adrian, 2004). C'est ainsi que :
 - Certaines espèces d'insectes et d'acariens l'attaquent de préférence telles que *Plodia interpunctella*, *Tenebroides mauritanicus*, *Acarus siro* (Steffan, 1978).
 - Il est utilisé dans des préparations diététiques (Lebet, 2004) ; au niveau industriel, seuls les germes de maïs sont délipidés (Godon, 1991).
 - L'albumen : Il comprend les réserves du grain qui sont importantes pour le développement de l'embryon et pour celui des déprédateurs. Dans le cas des blés, il représente la partie du grain qui intéresse en priorité les transformateurs pour la production de farines.
 - Les enveloppes : Elles ont un rôle de protection. C'est ainsi qu'entre autres effets, un grain cassé ou piqué, ayant perdu l'intégralité de ses enveloppes, va favoriser la multiplication des déprédateurs animaux et microscopiques (ITCF, 2001 ; Boucon, 2004).

Respectivement, les proportions de ces différentes parties par rapport au poids du grain sont de 3%, 80 à 85% et 13 à 17% (germe, albumen, enveloppes respectivement) (Feillet, 2000).

2.3.2-Composition des grains

D'une façon générale, le grain mûr des céréales est sec et particulièrement riche en glucides, plus précisément en amidon. Sa teneur en protéines est également appréciable.

Le tableau 2 donne une composition générale et montre des différences spécifiques au niveau de la teneur en protéines, lipides, cellulose et de la valeur énergétique des grains.

En ce qui concerne le triticale, la teneur en matières azotées est très variable (de 12 à 23% de la matière sèche) selon l'origine génétique, les conditions culturales et la productivité, la teneur diminuant lorsque le rendement en matière sèche s'élève (Benbelkacem, 1987). D'après ce dernier auteur et Belloucif (1999), à teneur en protéines égale, le triticale, comparativement au blé, est plus riche en lysine (20 % environ) ce qui lui confère un intérêt nutritionnel supérieur pour l'alimentation animale (Laroche, 1981). Des résultats prometteurs ont déjà été notés pour les monogastriques et les ovins ainsi que du point de vue potentiel de production et souplesse d'adaptation (Hachemi, 1977 ; Benbelkacem, 1987 ; Benbelkacem, 1991).

Les céréales présentent une composition riche et variée intéressante pour l'alimentation. Elles occupent une place privilégiée dans le commerce mondial et national des denrées alimentaires où les différents aspects qualitatifs les concernant sont contrôlés.

Espèce	Protéines	Matières grasses	Matières minérales	Glucides	Célestes (mg/g)
Blé	14.1	2.0	0.2	78.8	2.8
Orge	13.1	2.1	0.1	78.7	6.2
Avoine	14.8	4.2	0.2	87.8	28.4
Mil	10.6	6.2	1.2	81.2	2.6
Sorgho	11.2	1.4	1.2	78.2	2.7
Legne	17.4	1.8	0.1	80.1	2.8

Tableau 2 : Composition moyenne du grain de différentes céréales (% de la matière sèche) (d'après Kellner et Becker, 1966, et les tables du National Research Council, 1958 In: Moule, 1971)

2.4-Aspects qualitatifs.

Dans la filière « Céréales », le terme qualité peut correspondre à des aspects divers, fonction du partenaire concerné (producteur, stockeur, transformateur). Le produit de base étant vivant et le produit final étant destiné à l'alimentation, les céréales et dérivés primaires présentent une hétérogénéité et une variabilité dépendant :

- Des caractéristiques génétiques qui confèrent aux espèces et variétés une valeur d'utilisation particulière (Kiger, 1967 ; Abecassis et Chaurand, 1997 ; Feillet, 2000 ; Laconde, 2003 ; Roussel, 2003 ; Rousset, 2003).
- Des principaux facteurs de production (climat, sol, fumure,...) et de leurs interactions avec la plante (Matveef, 1963 ; Donnely, 1979 ; Beaux et Martin, 1984 ; Martin, 1990 ; Kleiber *et al.*, 2002 ; Caron *et al.*, 2007 ; Abdellaoui et Mariche, 2008).
- De l'évolution des composés du grain dans le temps, en relation avec les conditions de stockage et de conservation (Multon, 1982 ; Tipples, 1995 ; Cahagnier, Fleurat-Lessard, 1996).
- Des conditions de trituration et de transformation (Crétois, 1990 ; Spicher et Zwingelberg, 1990 ; Potus *et al.*, 1991 ; Willm et Jollet, 1994 ; Suchet, 1995 ; Fourné *et al.*, 1998).

Parler de la qualité dans ces conditions n'est donc pas aisé car les nombreux partenaires de la filière présentent une diversité des exigences, des contraintes et des objectifs et une certaine autonomie les uns par rapport aux autres. Pour promouvoir une politique de la qualité, un compromis permanent doit exister entre les caractéristiques souhaitées par chacun des maillons de la filière, compromis qui ne peut être que le fruit du dialogue et de la négociation.

Plusieurs aspects qualitatifs des grains peuvent être distingués :

- La qualité agronomique à laquelle s'intéresse le producteur : rendement, résistance aux maladies, à la verse, au mitadinage, précocité,...
- La qualité commerciale qui, par le biais de la législation, définit un lot « sain, loyal et marchand », fixe le prix du quintal d'une céréale donnée de qualité standard et les bases de réévaluation du prix net du quintal en rapport avec les caractéristiques physicochimiques du lot faisant l'objet de la transaction.
- La qualité sanitaire, résultante complexe dont l'appréciation nécessite la détermination de l'état « physique » du grain (teneur en eau, température, teneur et nature des impuretés, masse à l'hectolitre ou « PS »), de son activité amylolytique, de l'état d'infestation ou d'infection par les déprédateurs et de la teneur en contaminants (Multon, 1982).
- La qualité alimentaire incluant les caractères organoleptiques, la qualité nutritionnelle et l'innocuité c'est-à-dire l'absence de produits toxiques.
- La qualité technologique qui représente l'aptitude de la matière première à être mise en œuvre dans les industries de première et deuxième transformation (Multon, 1982 ; Laconde, 2003 ; Rousset, 2003) : meunerie, semoulerie, panification, biscuiterie, pâtes alimentaires,...
- La qualité réglementaire définie par le législateur : des spécifications sont fixées en fonction de l'orientation des produits et de l'utilisation ultérieure (semences, stockage, transformation, alimentation humaine ou animale).

Pour notre expérimentation, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux blés (tendres et durs) : nous allons donc détailler la qualité technologique de ces deux espèces, les plus cultivées et consommées dans le monde, puis l'aspect qualitatif d'actualité au niveau mondial : la qualité sanitaire des grains et dérivés.

2.4.1-Qualité technologique des blés.

Le blé dur (*Triticum durum* Desf.) et le blé tendre (*T. aestivum* L.) se distinguent à l'origine par leur patrimoine génétique (28 et 42 chromosomes respectivement) qui leur confèrent des caractères morphologiques, physiologiques et technologiques différents.

2.4.1.1-Caractéristiques physiques et biochimiques des grains de blé dur et blé tendre.

Etant à la base génétique, la différenciation va se concrétiser au niveau morphologique et technologique.

2.4.1.1.1-Au niveau morphologique.

La distinction entre grains de blé dur et blé tendre repose essentiellement sur deux caractéristiques morphologiques caractéristiques des deux espèces :

- La forme du grain : le blé dur est allongé et comprimé latéralement, le blé tendre est généralement court et de forme arrondie.
- Le sommet du grain : le blé dur présente un sommet assez pointu et non poilu, le grain de blé tendre présentant toujours une brosse poilue.

2.4.1.1.2-Au niveau composition et caractéristiques qualitatives.

Comme pour l'ensemble des céréales, les glucides sont les plus importants pondéralement dans les grains de blé et dérivés ; cependant, les protéines du blé, outre leur importance pondérale, présentent une particularité par rapport à toutes les autres céréales : elles sont douées, par le biais du gluten, de caractéristiques plastiques (extensibilité, élasticité, ténacité) ce qui permet la production d'une gamme incommensurable de dérivés (Kiger, 1967 ; Feillet, 2000).

Le gluten comprend deux fractions, les gliadines et les gluténines dont la composition en sous-unités de haut (SG-HPM) et de faible (SG-FPM) poids moléculaire et les proportions vont influencer sur la qualité technologique de chacune des espèces de blé (Sadouki, 1985 ; Godon, 1991 ; Feillet, 2000 ; Roussel et Chiron, 2002).

Les grains de blé présentent une texture vitreuse ou opaque et une teneur en protéines pouvant atteindre 18%, suivant les variétés et les conditions de culture (Godon, 1991 ; Deghaïs *et al.*, 2003), les blés tendres présentant, en général, une texture farineuse et une teneur en protéines comprises entre 8 et 13%. Il existe, cependant, des blés de force tels que *Manitoba Hard* (Canada), *Hard Red Springet Hard Red Winter* (USA) dont la teneur en protéines peut atteindre 16% (Deleau, 1999 ; 2002). Il faut signaler le cas des blés tendres fourragers dont la teneur en protéines peut atteindre 17% mais dont la qualité technologique est très faible à nulle.

Une caractéristique essentielle des blés durs permet de les distinguer des blés tendres, la concentration en pigments caroténoïdes de l'endosperme qui, chez le blé dur, est nettement plus élevée que celle du blé tendre. Cette caractéristique, jointe à celles de dureté de l'amande et de la richesse en protéines, font que les blés durs sont utilisés exclusivement pour l'alimentation humaine : ils sont les plus aptes à donner des semoules convenant à la fabrication des pâtes alimentaires (Abecassis et Chaurand, 1997). C'est ainsi que, dans les critères de qualité des pâtes alimentaires à l'état cru, la caractéristique de couleur occupe une place essentielle par référence aux exigences du consommateur.

En ce qui concerne les caractéristiques rhéologiques, le blé dur est connu pour sa ténacité particulièrement élevée par rapport au blé tendre qui présente une extensibilité plus importante.

En relation avec leur composition et leur texture, la qualité technologique de chacune des espèces est distincte par la valeur meunière ou semoulière d'une part, et la valeur boulangère ou pastière des variétés, d'autre part.

2.4.1.2-La valeur meunière ou semoulière

qui correspond à l'aptitude d'un lot de blé à donner un rendement élevé en farine ou semoule de pureté déterminée. Ce critère intéresse le meunier dont la préoccupation majeure est d'obtenir un rendement élevé en produit fini.

La valeur meunière ou semoulière est tributaire de plusieurs facteurs qui peuvent être regroupés en trois groupes principaux (Grandvoinet, 1991 ; Abecassis, 1993) :

- Les facteurs extrinsèques, liés aux conditions de culture et de récolte : Teneur en eau des grains, teneur et nature des impuretés diverses contenues dans le lot de blé, taux de grains cassés, taux de mitadinage du blé dur
- Les facteurs intrinsèques qui vont influencer sur les blés nettoyés à leur arrivée sur le premier broyeur : rapport albumen sur enveloppes, dureté ou friabilité de l'albumen, facilité de séparer l'albumen des enveloppes.

Une seule méthode permet de déterminer directement la valeur meunière ou semoulière : la mouture expérimentale. Celle-ci reste la méthode de référence, le moulin d'essai utilisé devant avoir un diagramme proche de celui du moulin industriel.

- Les facteurs réglementaires : il s'agit de la richesse en matières minérales des grains du fait que l'albumen est beaucoup moins minéralisé que les enveloppes et la couche à aleurones. Il est admis, en France comme en Algérie, que le taux de cendres des semoules et farines est en relation directe avec leur pureté et leur taux d'extraction, ce qui n'est pas toujours vrai ; en effet, le taux de cendres des semoules dépend principalement de la teneur en matières minérales du grain d'autant plus que l'albumen du blé dur contient 50% de la totalité des matières minérales du grain contre 20-25% pour le blé tendre (Mauzé *et al.*, 1972 ; Abecassis et Feillet, 1985). Dans ce cas, la réglementation favorise les blés faiblement minéralisés dont les dérivés pourront présenter un taux de cendres faible sans que la pureté ne soit élevée.

D'une façon générale, plus le taux d'extraction d'une farine ou semoule augmente, plus sa valeur nutritionnelle s'élève et ses aptitudes à la conservation diminuent.

2.4.1.3-La valeur boulangère des blés tendres.

D'après Roussel et Chiron (2002), la valeur boulangère comporte des notions distinctes :

- Le rendement en pâte qui correspond à la capacité d'absorption en eau de la farine pour une consistance donnée.
- La tolérance de la pâte au pétrissage, particulièrement dans le cas du pétrissage intensifié, tout en conservant ses caractéristiques plastiques.
- La machinabilité de la pâte c'est-à-dire son aptitude à être travaillée à la main ou à la machine aux différents stades de la fabrication, en conservant ses caractéristiques d'élasticité, de stabilité, d'aptitude à la déformation de la pâte et en évitant le caractère collant, préjudiciable à la production.
- Une activité de fermentation suffisante et régulière.
- Le développement de la pâte et du pain et son aspect extérieur.
- La qualité organoleptique de la mie du pain (couleur, odeur, texture).

Ces différentes notions peuvent être appréciées, pour le pain courant français, directement par l'essai de panification normalisé (Mauzé *et al.*, 1972 ; Roussel, 1997 ; ITCF, 2001).

Suivant les spécialités à produire (pain, biscuits, biscottes, pâtisserie, viennoiserie), la force boulangère exigée est variable comme le montre le tableau 3.

Ce tableau associe le taux de protéines (aspect quantitatif) à la force boulangère mesurée par le « W » alvéographique (aspect qualitatif des protéines) (Fig. 4) (Colas, 1991). Ainsi, il ressort que les produits nécessitant un développement important (biscottes), une incorporation de matières grasses, de sucre et d'œufs élevée (viennoiserie, pâtisserie) ou une technique de fabrication intensive (pain français, nouvelles technologies) nécessitent

des farines de force ($W \geq 250$), riches en protéines. A l'opposé, la farine pour biscuits secs et, à l'extrême, la farine pour gaufrettes, doivent présenter une force boulangère et une teneur en protéines très faibles ce qui permet d'assurer une bonne stabilité dimensionnelle aux produits fabriqués.

La force boulangère peut être déterminée à l'aide de certaines analyses parmi lesquelles nous pouvons citer l'extraction et la détermination du gluten, le dosage de l'azote, l'alvéographe, le farinographe, le test de Zélény,...(Mauzé *et al.*, 1972 ; Branlard et Loisel, 1997 ; ITCF, 2001). Les résultats de ces analyses, intéressantes pratiquement pour l'orientation et l'utilisation des blés, sont dépendants, cependant, des facteurs agro-climatiques et ne permettent pas d'évaluer la qualité intrinsèque de la variété. La détermination de la composante purement génotypique de la qualité est possible à partir d'électrophorégrammes de gliadines pour la sélection des blés durs présentant une qualité culinaire acceptable et d'électrophorégrammes de gliadines et surtout de gluténines pour la reconnaissance de blés tendres de force boulangère élevée(Autran et Morel, 1997 ; Feillet, 2000).

Domaine d'utilisation	W (ergs/g)	Protéines (g/100g)
BISSOU-FÉCONDÉ	120-160	13-17
BISCUITS, PAN DE MIE	↓	↓
PAN		
ALLIAGES PÂTISSERIE	↓	↓
BISCUITS SECS		
ACIERS FOUIL		
GAUFRETTES	70	7-8

Tableau 3 : Evolution des caractéristiques « W » et « Protéines » des farines en fonction de leur domaine d'utilisation (Colas, 1991).

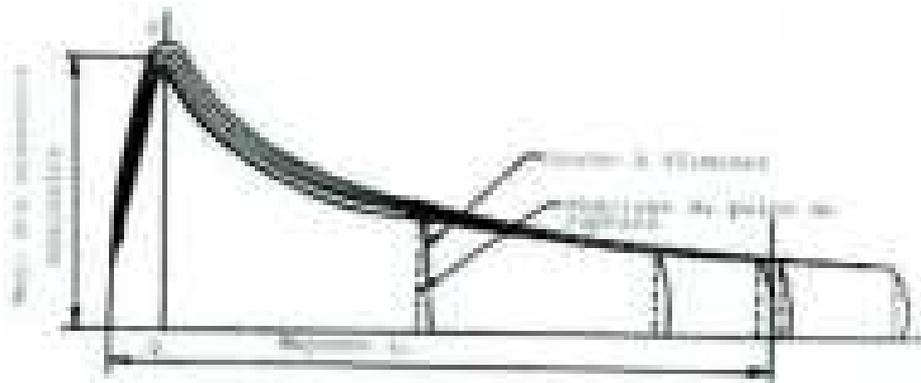


Figure 4 : Alvéogramme type (AFNOR, 1982)

Légende : P = Ténacité = Moyenne des ordonnées maximales $\times 1,1$

=PQ $\times 1,1$ (mm)

G = Moyenne des indices de gonflement (mL), correspondant aux abscisses de rupture, lue sur l'abaque de gonflement.

L = Moyenne des abscisses à la rupture des courbes (mm) correspondant à G moyen.

W = Travail de déformation lamellaire de la pâte, ramené à un gramme de pâte (ergs/g)

= 6,54 S où S représente la surface de la courbe en cm².

2.4.1.4-La valeur pastière des blés durs.

Elle correspond à (Abecassis et Chaurand, 1997):

- L'aptitude des semoules à être transformées en pâtes alimentaires (capacité d'hydratation, énergie nécessaire pour le malaxage,...)
- La qualité des produits finis avant et après cuisson (résistance à la rupture, couleur des pâtes crues, qualité culinaire) qui peut être déterminée à l'aide de méthodes d'analyses directes (fabrication expérimentale et essai de cuisson de pâtes alimentaires) et indirectes (teneur en protéines, en gluten, qualité du gluten, texture superficielle des pâtes, teneur en pigments caroténoïdes, en lipoxygénases ; gerçures, piqures dans les semoules, moucheture du grain, nuance brune d'extrait aqueux). Le consommateur recherche des pâtes alimentaires claires et de couleur jaune-ambrée, la coloration des semoules et pâtes alimentaires étant la somme d'une composante jaune que l'on veut élevée et d'une composante brune qui doit être faible.

La qualité pastière d'un blé dur est d'autant plus élevée que ses teneurs en protéines et en pigments caroténoïdes sont importants, que son activité lipoxygénasique est réduite et que ses gliadines sont du type 45. Du fait qu'actuellement le séchage des pâtes est réalisé à haute et très haute température, il est admis, généralement, que la teneur en protéines intervient pour 2/3 dans la note de leur qualité culinaire et la qualité des protéines (gliadine de type γ -45 ou γ -42) pour un tiers seulement (Feillet, 2000).

2.4.2-Qualité sanitaire des céréales et dérivés.

La qualité sanitaire des céréales destinées à la consommation humaine et animale est une exigence de sécurité absolue. Elle représente un enjeu commercial, de santé publique et de protection du consommateur. Du semis à la transformation, des facteurs naturels (climat, maladies, déprédateurs animaux) et humains (traitements pesticides, manutentions) vont entraîner la présence d'impuretés et de contaminants dans les grains. A chaque stade existe un risque de voir apparaître ou de créer des impuretés. Celles-ci peuvent être distinguées en deux classes, nuisance à la propreté des lots ou à leur état sanitaire :

- La première classe correspond aux impuretés physiques du grain et aux corps étrangers (grains cassés, grains endommagés, impuretés diverses, déprédateurs) qui peuvent occasionner quatre risques principaux : la réduction du rendement en mouture, la détérioration de la qualité technologique, les risques sanitaires et l'endommagement des installations (Boucon, 2004).
- La seconde classe d'impuretés est liée directement à l'hygiène : Ce sont les métaux lourds, les résidus pesticides, les mycotoxines et les microorganismes pathogènes auxquels il faut ajouter les souillures animales (débris d'insectes, acariens, poils de rongeurs). Au-delà d'un certain taux, la présence de ces contaminants rend les matières premières ou les produits finis impropres à la consommation humaine et animale (Peyruchaud, 2001 ; Fleurat-Lessard, 1997). Des analyses de laboratoire, pointues et coûteuses, permettent de les détecter et de les quantifier.

Outre les impuretés toxiques ou présentant un danger pour la qualité sanitaire des grains que nous avons présentées précédemment (paragraphe 2.1.), nous allons, ci-après, donner quelques précisions relatives aux contaminants des céréales.

2.4.3-Les microorganismes.

Les contaminants microbiologiques sont des levures, des champignons ou des bactéries. La flore banale, tels que les levures, certains champignons et coliformes totaux, est sans danger pour la santé par opposition à la flore pathogène qui peut entraîner des troubles graves de la santé humaine ou animale (Richard-Molard, 1982 ; Dunoyer, 1989 ; Richard-Molard et Cahagnier, 1989). Cette contamination peut être due à l'environnement en culture, à un intrant dans le process, au matériel ou au personnel. Le nettoyage des grains ainsi que leur mouture permettent de réduire la contamination (Potus *et al.*, 1991 ; Suchet, 1995 ; Duc et Bezet, 2003). La cuisson des pains et autres dérivés des grains va également réduire ce danger par l'action d'une température élevée (Roussel, 2003). Cependant, à côté de ces produits finis traditionnels, existent des produits pour lesquels la qualité microbiologique des ingrédients doit être particulièrement élevée. C'est le cas des farines prêtes à l'emploi, de pâtes, de pains précuits, d'aliments infantiles,... (Spicher et Zwingelberg, 1990).

2.4.4-Les résidus pesticides.

Ce sont des résidus de produits phytosanitaires appliqués en culture et au stockage. Leur toxicité, liée aux expositions à des niveaux élevés, pourrait entraîner des allergies, des cancérogenèses ou des pathologies neurologiques ((Peyruchaud, 2001) ; en cas de traitements répétés, la concentration en résidus peut être supérieure à la limite maximale de résidus tolérée.

2.4.5-Les métaux lourds.

Ce sont des contaminants naturels des roches et des sols. On peut les retrouver sous forme d'éléments trace dans les céréales et dérivés, à la suite d'une pollution atmosphérique (en particulier pour le plomb) ou du sol (cas du cadmium et du mercure) (Peyruchaud, 2001). L'exposition à des niveaux élevés de ces contaminants peut entraîner des troubles graves de la santé relatifs au cerveau, à la déminéralisation des os et aux systèmes sanguin, nerveux et rénal

2.4.6-Les souillures animales.

Ces souillures, lorsqu'elles sont contenues dans les produits céréaliers (*filth* en anglais), sont laissées par les animaux lors de leur séjour, à l'intérieur ou par contact. Elles correspondent aux insectes entiers et à leurs débris (grains contenant des formes cachées soumis à la mouture), aux acariens et aux poils de rongeurs qui représentent donc des indices de pollution animale dans les grains ou dérivés. L'effet pathogène de ces contaminants peut se manifester directement (troubles allergiques) ou indirectement, en véhiculant des microorganismes toxigènes (*Aspergillus*) ou pathogènes (salmonelles, leptospirose, amibiase...) (de Luca, 1977 ; Fleurat-Lessard, 1990).

III -Les bioagresseurs des céréales en post-récolte. Impacts sur les différentes composantes de la qualité et réglementation.

Comme le montre la figure 5, les agents biologiques d'altération des céréales stockées sont essentiellement représentés par les microorganismes, les acariens et les insectes.

Les oiseaux et les rongeurs peuvent également occasionner de graves déprédations mais ce risque peut être annulé par des mesures préventives et curatives connues et l'utilisation de moyens de stockage appropriés (Grolleau et Gramet, 1982 ; Bitner, 1991) tandis que le développement des microorganismes et des acariens n'est possible que lorsque l'humidité relative est au moins égale à 65%. Il s'ensuit que, du fait de leurs exigences écologiques particulièrement limitées, les insectes constituent un danger majeur : d'une façon générale, ils peuvent supporter une ambiance assez sèche de l'ordre de 35% d'humidité relative (environ 9% de teneur en eau du grain de blé) et même moins pour certaines espèces (Trogoderme, vrillette,...). Certaines espèces peuvent entrer en diapause lorsque les conditions sont défavorables ou supporter un jeûne prolongé (INPV, 1981 ; Steffan, 1978).

Bien qu'en Algérie la teneur en eau des grains locaux à la récolte est, généralement, très basse ($\leq 12\%$), la microflore peut, cependant, constituer un danger certaines années où les conditions climatiques sont favorables au développement de *Fusarium* sp. mais également d'*Aspergillus* sp. signalés par Riba *et al.*, (2008). Les espèces des stocks peuvent également s'y développer accidentellement au cours du stockage. Il faut rappeler que les céréales commercialisées sont issues en grande partie de l'importation : les grains importés, stockés au préalable dans le pays d'origine, ont de fortes chances de présenter un pourcentage de contamination microbienne assez élevé et/ou de contenir des mycotoxines d'espèces fongiques du champ ou des stocks.

3.1-Principaux insectes ravageurs des stocks.

Deux ordres principaux comprennent la majorité des espèces inféodées aux stocks : il s'agit des coléoptères et des lépidoptères, insectes à métamorphose complète, dont la propagation a été favorisée par les échanges internationaux. Ils présentent un comportement particulier qui leur permet de résister aux mouvements des masses de grains (Fleurat-Lessard, 1982).

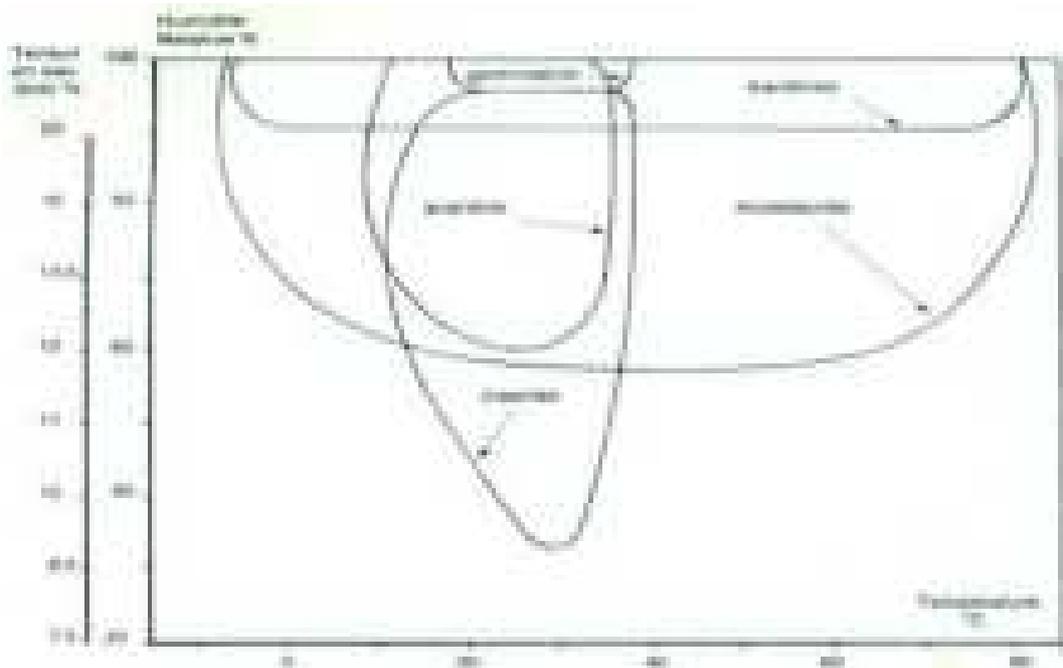


Figure 5 : Limites physiques pour la multiplication des agents biologiques dans un stock de céréales (Cangardel, 1978).

Les insectes des stocks se distinguent des ravageurs de culture par la nature de l'environnement dans lequel ils évoluent (Fleurat-Lessard, 1982). D'une façon générale, les insectes du champ sont spécifiques aux cultures sur pied ; c'est le cas de la punaise des céréales, redoutable ravageur en Algérie classé en tant que fléau par l'INPV (INPV, 2010). Outre les pertes pondérales et qualitatives (nutritionnelles et technologiques) occasionnées par ce déprédateur du champ aux grains attaqués, ils favorisent, au niveau du stockage, la multiplication des charançons en réduisant la durée de développement des larves (Fourar et Fleurat-lessard, 1997).

Certaines espèces d'insectes que l'on rencontre au niveau des stocks sont également présentes au niveau des champs (*Sitophilus oryzae* L., *S. zeamais* Motsch., *Sitotroga cerealella* Oliv.) alors que certaines sont spécifiques au stock.

Dès la transformation des nymphes en adultes, les accouplements ont lieu et, généralement, il suffit d'un seul pour qu'une femelle puisse féconder les quelques dizaines ou centaines d'œufs qu'elle pondra au cours de son existence : lors de l'accouplement, les spermatozoïdes sont stockés dans la spermathèque pour être utilisés au fur et à mesure des besoins (Steffan, 1978).

Sous leur forme adulte, à des températures comprises entre 15°C et 35°C et une HR variant de 50 à 80%, les coléoptères vivent plus longtemps que les lépidoptères (Steffan, 1978).

Parmi les ravageurs primaires, on distingue les insectes à formes cachées représentés par les charançons (*Sitophilus* sp.), le capucin (*Rhizopertha dominica*) et l'alucite (*Sitotroga cerealella* Oliv.) de ceux qui présentent des formes libres. Les premiers passent une partie de leur vie à l'intérieur des grains, ce qui ne permet pas de les détecter à l'œil nu lorsqu'ils sont aux stades pré imaginaires : le grain infesté semble sain. Ce n'est qu'au stade adulte qu'on peut les observer contrairement aux insectes à « formes libres » dont le développement est externe (Fleurat-Lessard, 1991). Ces derniers sont considérés comme

ravageurs secondaires mais, dans les produits de mouture ou les produits pulvérulents, ils peuvent devenir particulièrement nuisibles.

Plusieurs méthodes de détection des formes cachées existent parmi lesquelles la radiographie des grains (Fig. 6) et la méthode acoustique (Le Torc'h, 1980).



Figure 6 : Radiographie de grains infestés par *Sitophilus oryzae* L., mettant en évidence les formes cachées de l'insecte (INRA, Fleurat-Lessard, 2010).

Le niveau de tolérance des insectes des stocks est plus strict que celui des insectes de culture au niveau des transactions commerciales mondiales où l'absence de tout individu vivant est exigée.

Au niveau des stocks se trouve une multitude d'espèces à critères écologiques voisins qui constituent une succession des peuplements variable en fonction d'une part de l'aptitude des espèces à attaquer directement le grain et à permettre l'implantation d'espèces moins performantes et, d'autre part, du régime alimentaire.

3.2-Succession des peuplements.

Dans un stock de céréales, nous pouvons rencontrer (Cangardel, 1978) :

- Des hôtes primaires caractérisés par la capacité à attaquer directement le grain et à favoriser l'implantation d'autres espèces. Cette catégorie de déprédateurs peut comprendre les oiseaux, les rongeurs, les acariens des grains (*Acarus*, *Tyrophagus*), les insectes cléthrophiens (*Curculionidae*, *Bostrychidae*, *Gelechiidae*), les moisissures et les bactéries.
- Des hôtes secondaires qui se développent sur des céréales déjà dépréciées physiquement ou biologiquement tels que grains cassés, piqués ou moisissus. Il s'agit des insectes saprophages (*Nitidulidae*, *Cryptophagidae*), des insectes et acariens mycophages ou d'insectes psychophages (*Cucujidae*, *Tenebrionidae*, *Pyralidae*,...).
- Des hôtes tertiaires, espèces généralement liées à la présence de déprédateurs primaires ou secondaires dont ils sont parasites ou prédateurs. Ils comprennent les espèces ectoparasites, les acariens et les insectes prédateurs ainsi que les espèces nécrophages.

3.3-La microflore des grains

La microflore des grains et graines leur est naturellement associée ; elle se compose de genres et espèces très divers de bactéries, levures et champignons microscopiques (Richard - Molard, 1982 ; Champion, 1997). Ces microorganismes, contenus dans le sol, sont véhiculés vers les grains par l'air ou l'eau et les contaminent soit au niveau du champ soit lors de la récolte, du battage ou des manutentions qui suivent ; sur les grains, on peut rencontrer, des champignons parasites ou à tendance parasitaire, responsables de maladies en culture ainsi que des microorganismes saprophytes (bactéries, levures, champignons) qui peuvent occasionner, au cours du stockage, des altérations graves diverses. Par référence aux exigences hydriques de la microflore, les bactéries et les levures portées par les grains n'ont qu'une incidence très faible dans les conditions hydriques habituellement réalisées lors du stockage. Ce sont les champignons microscopiques appelés improprement moisissures qui, en raison de leurs aptitudes écologiques et physiologiques, peuvent constituer un danger sérieux dans les grains stockés insuffisamment secs (Fig. 7).

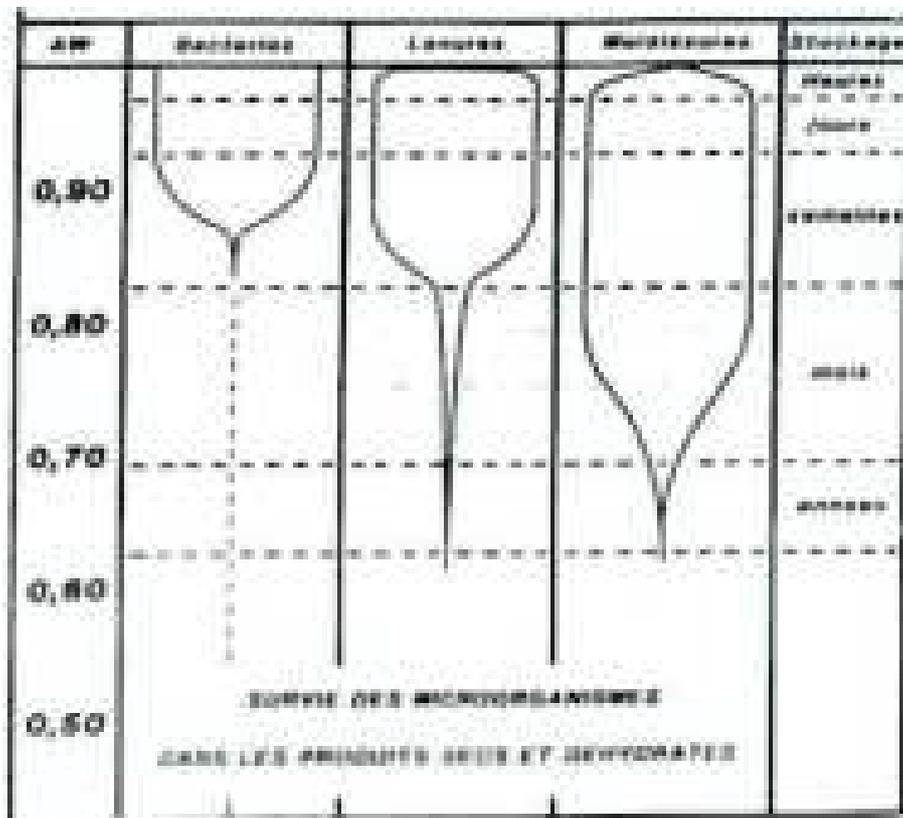


Figure 7 : Influence de l'activité de l'eau (A_w) sur la multiplication des microorganismes et l'aptitude au stockage des denrées alimentaires (Cahagnier, 1989 a).

3.3.1-La mycoflore des grains stockés

Au sein du règne des champignons renfermant, suivant les auteurs, de 65 000 à 100 000 espèces différentes, les moisissures constituent un ensemble hétérogène d'environ 20 000 espèces (Berthier et Valla, 2008). Ces microorganismes eucaryotes sont des organismes pluricellulaires dont l'appareil végétatif, le thalle, est formé de longs filaments ramifiés et souvent cloisonnés appelés hyphes. Sur un substrat nutritif solide, la colonie fongique est

constituée d'un réseau d'hyphes appelé mycélium, visible à l'œil nu qui se présente comme une sorte de feutrage de couleur spécifique à l'espèce : la marge de la colonie envahit le substrat alors que les régions centrales, plus âgées, donnent naissance à des organes de multiplication et de reproduction, les conidies, mesurant le plus souvent quelques microns ; chacune d'entre elles est capable de produire une colonie lorsque les conditions sont favorables.

Toutes les moisissures s'attaquant aux aliments et la plupart des champignons ont une multiplication asexuée dont les modalités sont caractéristiques des groupes, des genres et des espèces (Cole et Kendrick, 1981 *In* Berthier et Valla, 2008). Certaines espèces sont, en outre, capables d'une reproduction sexuée (au moins dans certaines conditions de croissance) et, suivant les modalités de cette reproduction sexuée, elles sont classées parmi les Zygomycètes, les Ascomycètes ou les Basidiomycètes. Cependant, la plupart des genres rencontrés sur les grains stockés ne se multiplient que par voie asexuée et on ne leur connaît pas de reproduction sexuée. C'est ainsi que ces champignons sont dits « imparfaits » et ils sont classés dans les Deutéromycètes ou *Fungi imperfecti* (Richard-Molard, 1982).

Comparées aux bactéries, on peut considérer les « moisissures » comme des protistes supérieures capables d'une certaine différenciation cellulaire et de l'élaboration de structures de différenciation extrêmement diversifiées du point de vue morphologique, ce qui constitue une base dans la classification (Richard-Molard, 1982).

3.3.2-Champignons des stocks et denrées alimentaires

Non photosynthétiques, les moisissures ne peuvent se développer, lorsque les conditions sont favorables, que sur des substrats organiques qu'elles peuvent coloniser. Dans ce cas, elles peuvent fortement sporuler, une « colonie » produisant un très grand nombre de conidies d'où un très grand pouvoir de dissémination et de contamination. Cependant, la contamination d'un aliment par une conidie n'implique pas toujours une altération ultérieure du produit.

Les champignons ont donc besoin de prélever du milieu des matières organiques structurales et énergétiques pour se développer. Dans ce but, ils disposent d'un potentiel enzymatique exceptionnel, en particulier des dépolymérases, ce qui leur permet d'hydrolyser les macromolécules telles que la cellulose, l'amidon, les lipides... En ce qui concerne l'azote, les moisissures l'assimilent aussi bien sous forme organique que minéral. Le rapport C/N pour une croissance optimale des bactéries et des champignons est compris entre 8/1 et 12/1 alors que, lorsqu'il s'élève (C/N \approx 30), il devient peu favorable pour les bactéries et reste acceptable pour les champignons : *Trichoderma* et *Fusarium* peuvent se développer sur des produits très déficitaires en azote comme les chaumes et les pailles (C/N > 80) (Berthier et Valla, 2008).

Ainsi, les aliments en général, et les matières premières végétales en particulier, constituent des substrats convenant aux moisissures à condition que le milieu renferme de l'eau libre. Les champignons microscopiques toxigènes les plus dangereux sont, pour la plupart, xérotolérants ; ils peuvent coloniser les aliments assez secs comme les céréales d'autant plus facilement que, pour de faibles activités en eau, ils ne sont plus concurrencés par les autres microorganismes. Il semble que les teneurs élevées en matières grasses des grains favorisent le développement des « moisissures » xérotolérantes et que ces lipides sont impliquées dans la mycotoxinogénèse (*In* Cahagnier, 1989 ; Richard-Molard et Cahagnier, 1989).

Il ressort donc que les champignons saprophytes peuvent coloniser toutes les denrées alimentaires du fait (Berthier et Valla, 2008) :

- Qu'elles disposent d'un arsenal enzymatique varié
- De leur tolérance à des pH très acides, à des teneurs en eau faibles et à des taux d'oxygène réduits
- De leurs aptitudes à croître de 0 à 40° C.

3.3.3-Champignons saprophytes et mycotoxines

Les mycotoxines sont des produits du métabolisme secondaire des champignons filamenteux pouvant se développer sur la plante au champ ou en cours de stockage

(*Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*) (Tabl. 4). Plus de 300 métabolites secondaires ont été identifiés parmi lesquels une trentaine seulement possèdent des propriétés toxiques réelles (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments AFSSA, 2006).

Les mycotoxines se retrouvent à l'état de contaminants naturels de nombreuses denrées d'origine végétale (céréales, fruits, noix, amandes, fourrages, dérivés) ainsi que dans les produits et dérivés d'origine animale (lait, œufs, viande, abats, ...). Beaucoup de ces toxines sont responsables d'intoxications sérieuses et, parfois, mortelles : le danger est grand d'autant plus qu'elles sont très stables dans le temps, la cuisson en général des dérivés des grains contaminés et la panification ne permettant pas leur destruction ; par contre, la mouture des grains entraîne leur réduction par élimination des enveloppes et du germe qui en sont les plus riches (Richard-Molard et Cahagner, 1989 ; Berthier et Valla, 2008) ce qui va constituer un problème sanitaire nouveau lorsque le son et les germes contaminés sont utilisés dans la fabrication d'aliments. Aujourd'hui, les mycotoxines doivent être classées parmi les toxines naturelles les plus puissantes que l'on connaisse. Chez le rat, animal de sensibilité moyenne, la DL 50 est souvent de quelques mg/kg. Les trichothécènes, avec des DL 50 de 0,5 à 1 mg/kg, possèdent l'une des plus fortes toxicités à l'opposé de la zéaralénone (DL 50 de 1 à 20 g/kg) ; celle des aflatoxines est de 5,5 à 7,4 mg /kg (Berthier et Valla, 2008).

Certaines mycotoxines ont une toxicité aiguë très marquée, les effets chroniques étant les plus redoutables du fait des habitudes alimentaires et du pouvoir de rémanence de ces toxines ; les effets des principales mycotoxines sont répertoriés dans le tableau 5. Un autre risque, pour les consommateurs humains, est indirect car il est induit par la présence possible de mycotoxines incorporées dans l'alimentation des animaux. Ces contaminants correspondent à la toxine elle-même et/ou à des métabolites ayant conservé la toxicité du composé primaire. Les espèces animales d'élevage peuvent ainsi constituer un vecteur de ces toxines ou de leurs métabolites vers des aliments de grande consommation comme la viande, le lait ou même les œufs pour les volailles. C'est le cas de l'aflatoxine B₁ dont le métabolite, l'aflatoxine M₁, est retrouvé dans le lait des mammifères ayant ingéré des aliments contaminés par l'aflatoxine B₁ (AFSSA, 2006).

Les règles régissant la mycotoxinogénèse sont les suivantes (Le Bars, 1982 ; Berthier et Valla, 2008) :

- Si toutes les moisissures peuvent élaborer des métabolites secondaires, toutes ne synthétisent pas de mycotoxines.
- Pour une espèce réputée toxigène, toutes les souches ou isolats n'élaborent pas de mycotoxines.

Pour une souche toxigène, la capacité d'élaborer des toxines est très variable. Elle dépend de facteurs intrinsèques (âge de la souche,...) et extrinsèques (concurrence microbienne, nature chimique du substrat, conditions d'aération, de température, de pH, d'humidité) d'où l'impossibilité, actuellement, de dégager des lois générales de la toxigenèse : selon les espèces et les conditions d'expérimentation, ces paramètres biologiques et physicochimiques stimulent ou freinent la production de toxines.

	Mycotoxines	Acting agents producteurs
Mycotoxines approuvées ou en cours de évaluation	Ochratoxine A, B ₁ , B ₂ , B ₃	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>A. carbonarius</i> , <i>A. niger</i>
	Zéaraléon	<i>Fusarium moniliforme</i> , <i>F. verticillioides</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>F. incarnatum</i>
	Fumonoligines	<i>Fusarium proliferatum</i> , <i>F. verticillioides</i>
	Roquétol	<i>Fusarium proliferatum</i> , <i>F. verticillioides</i> , <i>F. incarnatum</i> , <i>F. moniliforme</i> , <i>F. oxysporum</i>
	Trichothécènes	<i>Fusarium proliferatum</i> , <i>F. incarnatum</i> , <i>F. verticillioides</i>
Autres mycotoxines	Extracellulaires	<i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>A. niger</i> , <i>A. terreus</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Stéroïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>
	Alcaloïdes	<i>Aspergillus nidulans</i> , <i>A. nidulans</i> , <i>A. nidulans</i>

Tableau 4 : Mycotoxines et agents producteurs associés retrouvés en alimentation humaine et/ou animale (AFSSA, 2006).

Mycoflora	Effets	Mécanismes d'action cellulaires et moléculaires
Alternaria (A) + M1	Produit de croissance Génotoxique Cytostatique Immunomodulateur	Formation d'acétoxydipérol Formulation d'acétoxydipérol Biotransformation par les enzymes AAL1 Cytotoxicité aux érythrocytes
Cladosporium	Produit de croissance Génotoxique Immunomodulateur	Impact sur la synthèse des protéines Inhibition de la production d'ATP Inhibition par les parois cell.
Penicillium	Produit de croissance Cytostatique	Inhibition des enzymes d'enzyme
Trichothecium (T) + F1 + G1 + G2	Produit de croissance Cytostatique Toxicité systémique	Inhibition de l'épithélium et du système Immunitaire et de la production d'ATP Inhibition de la synthèse des protéines Inhibition des immunoglobulines
Aspergillus	Produit de croissance	Inhibition des enzymes d'enzyme Inhibition de la production d'ATP Cytotoxicité aux érythrocytes
Fusarium (F)	Produit de croissance Génotoxique Cytostatique Immunomodulateur	Inhibition de la synthèse des protéines Inhibition de la production d'ATP Inhibition de la synthèse des protéines Inhibition des immunoglobulines

Tableau 5 : Effets identifiés ou suspectés des principales mycotoxines et mécanismes d'action cellulaires et moléculaires identifiés expérimentalement (AFSSA, 2006)

3.3.4-Cortèges et successions floristiques

3.3.4.1-Cortèges floristiques (Pelhate, 1982)

Les méthodes qualitatives et quantitatives de dénombrement des microorganismes dans les grains, graines et dérivés a conduit à des listes ou cortèges plus ou moins impressionnants et diversifiés selon la nature du substrat (céréales, oléagineux, protéagineux et dérivés, ...) : les inventaires varient selon le conditionnement préalable et le « passé » du lot (conditions de culture, de récolte, d'entreposage, âge, état sanitaire, nettoyage, mouture, ...). La distinction doit être faite entre divers types écologiques de champignons séminocoles dont l'origine et le devenir permet aux spécialistes de distinguer une « flore du champ », une « flore intermédiaire » et une « flore de stockage » :

- La flore du champ, à tendance phytopathogène, se développe sur la plante puis gagne la graine avant la récolte ; cependant, hygrophile, elle n'y subsistera qu'à l'état latent dans les conditions habituelles de siccité du grain stocké ; les genres *Alternaria*, *Epicoccum*, *Fusarium*, *Helminthosporium* (*Dreschlera*), *Septoria*... en sont les représentants les plus communs.
- La flore intermédiaire comprend des espèces à large dissémination atmosphérique à partir de substrats organiques divers et des plantes sénescentes : *Cladosporium cladosporioides*, mucorales,...
- La flore de stockage, grâce à sa xérotolérance, se développe, en saprophyte, au niveau de l'entreposage ; on y trouve les nombreuses espèces appartenant aux genres *Aspergillus* et *Penicillium*.

Ainsi, l'écologie présente une incidence fondamentale sur la flore des grains qui s'avère caractérisée par un dynamisme inéluctable.

3.3.4.2-Succession floristique

La répartition de la flore globale en trois entités écologiques implique une chronologie évolutive (Pelhate, 1982).

De nombreux inventaires, établis sur toutes sortes de denrées, ont démontré la succession inévitable des populations fongiques et bactériennes : sous le jeu des compétitions interspécifiques, on assiste, dans un laps de temps, à la destitution des éléments dominés au profit des plus forts, plus adaptés aux conditions du milieu (Cahagnier et Poisson, 1973 *In* : Pelhate, 1982). En effet, ce dynamisme de la flore globale, cause de toute altération, est régi par un certain nombre de paramètres abiotiques et biotiques. Il s'agit en priorité de la teneur en eau des grains qui aura une incidence déterminante sur l'évolution de la flore, la présence d'une eau solvante en quantité minimale étant à la base du démarrage du processus de colonisation. Des réactions en chaîne vont se manifester, entraînant une modification de l'environnement : l'eau et les calories engendrées par le développement du microorganisme colonisateur de départ vont favoriser une espèce mieux adaptée, plus exigeante en eau ou thermo-préférée et ainsi de suite suivant les conditions évolutives du milieu. Ce dynamisme peut être observé dans les silos et entrepôts où l'activité respiratoire du complexe grain-microorganismes peut conduire rapidement à l'échauffement des stocks et à leur altération ; ces réactions préjudiciables sont accélérées par la présence d'acariens et d'insectes qui vont également contribuer à l'humidification et à l'échauffement des grains.

3.4-Effets des bioagresseurs des grains stockés sur les différentes composantes de la qualité.

La présence d'insectes ou de microorganismes dans un lot de céréales ou dérivés entraîne des pertes quantitatives mais également qualitatives et sanitaires. Elle influe sur :

3.4.1-La viabilité des grains

qui baisse lorsqu'une infestation touche le germe ou s'illustre par un prélèvement trop important de l'endosperme, également dans le cas d'un échauffement des grains (Howe, 1973) ou d'une contamination par les microorganismes (Pelhate, 1982 a, 1982 b ; Cahagnier, 1989 b). Pour vérifier cette aptitude à la germination, le test le plus pratique est la détermination de la faculté germinative. Ce critère a été maintes fois évalué dans le cadre d'études sur les grains infestés par les insectes (Howe, 1973 ; Khare *et al.*, 1974 ; Lusting *et al.*, 1977 ; Sinha 1983 ; Imura et Sinha, 1984 ; Sinha, 1984 ; Chahal, 1985 ; Demianyk et Sinha, 1987 ; Sittisuang et Imura, 1987 ; Kapu *et al.*, 1989). C'est la première caractéristique du grain à être altérée par le « vieillissement physiologique » qui se produit en cours de stockage, les attaques des bioagresseurs accentuant ce vieillissement.

3.4.2-La valeur meunière ou semoulière

qui va diminuer suite au prélèvement de matière par les microorganismes mais surtout par les insectes. Ce prélèvement est fonction de l'espèce infestante et du taux d'infestation. Pour déterminer l'état de conservation d'un stock, on peut retenir essentiellement le pourcentage de perte de masse par rapport à un échantillon sain, le nombre d'insectes vivants ramené au

kg de grain et le pourcentage de grains attaqués (Schulten, 1982, Adams et Schulten, 1978 *In* : Ratnadass, 1987). Cette perte pondérale peut être évaluée par le pourcentage de perte à partir de méthodes basées sur la masse de 1000 grains, la masse à l'hectolitre (« PS ») et la mouture expérimentale (Imura et Sinha, 1984 ; Ramzan et Chahal, 1985 ; Amos et al . , 1986 ; Fourar, 1987 ; Khare et al . , 1987 ; Sittisuang et Imura, 1987 ; Fourar, 1994).

3.4.3-La valeur boulangère

qui est altérée par les conséquences du métabolisme des insectes et/ou des grains. Celui-ci peut s'élever au point d'entraîner l'échauffement des grains et donc la réduction de la force boulangère et de l'activité amylolytique, les composants biochimiques du grain ne supportant pas une élévation anormale de la température. C'est ainsi que quelques analyses technologiques ont été utilisées pour la mise en évidence de l'effet des infestations : Pelshenke, gluten humide, temps de pétrissage, essai de panification, qualité des protéines, alvéographe et activité amylolytique. Les résultats montrent, pour les farines infestées, une diminution du taux de gluten qui devient cassant et se désagrège, une tolérance au pétrissage plus faible, un volume du pain réduit, une force boulangère affaiblie avec réduction du gonflement (Venkat Rao *et al.*, 1959 ; 1960 ; Fourar, 1987). Dans le cas des champignons des champs, il a été montré que la force boulangère des farines issues de blés fusariés décline fortement au fur et à mesure que la contamination par le *Fusarium* s'élève ; parallèlement, l'activité amylolytique s'élève (Cahagnier, 1989 b; Duc et Bezet, 2003).

En dehors de l'échauffement, un autre facteur, tributaire de l'infestation par les insectes ou du niveau de contamination par les champignons microscopiques, influe sur la valeur boulangère. Il s'agit de l'élévation de l'acidité grasse qui a été constatée d'une façon générale et qui va entraîner l'altération de la qualité des farines dont la force boulangère sera affaiblie à nulle. L'augmentation de l'acidité grasse est fonction de l'espèce d'insecte infestante (Pingale *et al.*, 1954 ; Venkat Rao *et al.*, 1959 ; Sinha, 1983 ; Imura et Sinha, 1984 ; Demianyk et Sinha, 1987). Parmi les acides gras libres, certains sont attractifs pour des insectes des stocks tels que *T. castaneum*, ce qui va contribuer à renforcer l'infestation (Edwards, 1978 *In* : Farjan, 1983). L'acidité grasse peut être utilisée comme critère de baisse de la qualité (White et Jayas, 1991).

3.4.4-La qualité alimentaire :

Elle comprend trois aspects distincts relatifs :

3.4.4.1-Aux caractères organoleptiques

qui se détériorent du point de vue :

- Saveur et odeur. Ceci est particulièrement net pour les farines infestées par les *Tribolium*s qui dégagent une odeur désagréable due à la présence de substances quinoniques secrétées par les insectes (Venkat Rao *et al.*, 1959, 1960 ; Ladich *et al.*, 1967 ; Khare *et al.*, 1974 ; Fleurat-Lessard, 1982). Des odeurs de moisi apparaissent dans les grains même faiblement contaminés, odeurs que l'on retrouve dans les produits dérivés et qui sont dues à des composés volatils, type octène-1-ol-3 synthétisés par des *Penicillium*s (Cahagnier, 1989 b).
- Aspect qui peut devenir rebutant par la présence d'exuvies, de larves et d'adultes vivants et/ou morts, de soies de lépidoptères, d'excréments ; grains moisissus portant

un feutrage de couleur diverse suivant l'espèce en cause ; grains à la fois infestés et moisiss (Fig. 8).



Figure 8 : Grains de blé dur infestés par *S. oryzae* et contaminés par des champignons.

3.4.4.2-A la qualité nutritionnelle

Celle-ci, avec l'accroissement de la population d'insectes, accuse une baisse sensible relative à la quantité et à la qualité des protéines et autres composants de l'amande (Pingale *et al.*, 1954 ; Venkat Rao *et al.*, 1959, 1960 ; Kapu *et al.*, 1989). Il semble que les variétés de céréales les plus sensibles aux infestations par les insectes contiennent un plus grand nombre d'acides aminés par rapport aux variétés dites résistantes (Auclair, 1953 ; Auclair *et al.*, 1957 ; Kalode et Pant, 1967 ; David et Paul, 1973 ; Pandey et Pandey 1978 *In* : Sudhakar et Pandey, 1981). En effet, les acides aminés essentiels et la lysine sont considérés être un besoin diététique absolu pour la croissance optimum de *S. oryzae* (Baker, 1976 *In* : Sudhakar et Pandey, 1981 ; Daniel *et al.*, 1977 *In* : FAO, 1984). Rajan *et al.* (1975 *In* FAO, 1984) ont montré que le coefficient d'efficacité protéique du maïs baisse de 1,49 à 1,16 lorsque cette céréale est infestée par les insectes. En outre, l'infestation par les insectes affecte la teneur globale en matières grasses des graines avec tendance à favoriser la libération d'acides gras.

Les effets de l'infestation par les insectes sur la valeur nutritionnelle des grains stockés sont liés à la composition alimentaire de ce type de denrée, à la répartition des nutriments dans la graine et aux habitudes alimentaires des insectes (FAO, 1984). C'est ainsi que les charançons, qui se nourrissent principalement de l'albumen amylicé, réduisent la valeur calorique du blé mais ont un effet moindre sur les protéines et les vitamines concentrées essentiellement dans le germe et l'assise à aleurones. Par contre, les légumineuses infestées par les coléoptères perdent des protéines et des vitamines en plus des hydrates de carbone du fait que ces éléments nutritifs sont répartis plus uniformément dans la graine. Par ailleurs, l'infestation par les insectes d'échantillons de blé, maïs et sorgho en grains, entraîne des changements nets dans la teneur en calcium, phosphore, zinc, fer, cuivre et manganèse. Ceci est également fonction des habitudes alimentaires des insectes et de la distribution des minéraux dans le grain (Sudesh *et al.*, 1992). La même réflexion peut être

faite quant à la digestibilité des protéines et de l'amidon de céréales en grain infestées (Sudesh et Kapoor, 1992).

Outre la réduction de la qualité nutritionnelle des graines, une autre conséquence de l'infestation par les insectes est l'augmentation du taux relatif de fibres alimentaires de la graine infestée. Ceci s'illustre par l'augmentation du volume des selles du consommateur (Kritchevsky, 1977 *In* FAO, 1984 ; Cherbut et Champ, 1987) et la réduction de la durée du transit intestinal qui se traduit par une assimilation moins efficace de certains éléments nutritifs (protéines, calcium, fer, zinc) : la consommation d'aliments infestés va aggraver la sous-alimentation et la malnutrition.

Dans le cas des grains moisissés, il a été démontré que l'activité vitale des moisissures entraînait une modification sensible du substrat sur lequel elles vivent, une perte de matière sèche, une réduction de la valeur nutritionnelle par la modification de la composition du substrat et la synthèse de mycotoxines (Multon, 1982 ; Cahagnier, 1989b).

La qualité nutritionnelle peut être évaluée par le biais d'analyses biochimiques (azote, glucides, lipides, matières minérales) avec des contrôles plus fins d'éléments particuliers tels que les acides aminés, les sucres, les vitamines. Une technique biologique, intéressante et pratique, permet de donner une idée globale de la valeur nutritionnelle d'un produit et de la présence de substances antinutritionnelles. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'insectes des stocks *T. confusum* Duv. et *T. molitor* L. (Loschiavo *et al.*, 1969 ; Sharma *et al.*, 1977 ; Pracros, 1982 ; Pracros *et al.*, 1983 ; Fourar, 1994).

3.4.4.3-A la qualité sanitaire

Celle-ci concerne, d'une part, la proportion et la nature des microorganismes contenus dans un échantillon donné et, d'autre part, le taux de souillures d'origine animale s'y trouvant. C'est ainsi qu'au cours de stockages défectueux, le développement des microorganismes peut entraîner la dégradation de la qualité hygiénique des grains par le biais d'espèces mycologiques représentant des hôtes normaux et habituels des grains (*Fusarium*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Cephalosporium*, *Aspergillus*, *Penicillium*) (Cahagnier, 1989 b). D'après le même auteur, des troubles allergiques (rhinites, dermatites, asthme), des mycoses et mycotoxicoses, provoqués par la microflore céréalière, peuvent aller de l'accident léger (diarrhée, vomissement) à la mort de l'individu (aspergillose du poumon, aflatoxicoses cancéreuses du foie,...). En outre, la modification du substrat par des moisissures peut causer la formation de produits toxiques.

Les insectes et les acariens des denrées alimentaires peuvent favoriser la prolifération des microorganismes et véhiculer des germes, dont certains sont pathogènes, à l'extérieur de leur corps mais surtout dans leur tube digestif (De Luca, 1979 ; Gaudry et Fleurat-Lessard, 1988 ; Fleurat-Lessard, 1990). C'est le cas de *Sitophilus* spp., *Tribolium* spp., *Alphitobius diaperinus*,... C'est ainsi que l'infestation des céréales par les insectes et les acariens peut engendrer, entre autres effets, des allergies, des intoxications et des infections chez l'homme ou le bétail en consommant (De Luca, 1979). C'est le cas du Trogoderme dont la larve, recouverte de soies, est sans doute responsable de certaines allergies (Okumura, 1967). Les substances quinoniques secrétées par *Tribolium* sp., outre qu'elles détériorent l'odeur et le goût des produits infestés, ont un effet cancérigène détecté chez le rat (Fleurat-Lessard, 1990). Les acariens peuvent également provoquer un autre état allergique, l'asthme des meuniers, et entraîner des désordres intestinaux [Fleurat-Lessard, 1989 ; 1990 ; Kerp (*In* : De Luca, 1979)].

En ce qui concerne les contrôles, ceux-ci sont relatifs :

- Au domaine microbiologique, certains microorganismes contenus dans les denrées alimentaires étant responsables de graves intoxications comme les salmonelles, les

entérobactéries (*E. coli*), les moisissures. Un grand nombre de chercheurs se sont intéressés à l'infection microbiologique en liaison avec les infestations des céréales par les insectes (Howe, 1973 ; Lustig *et al.*, 1977 ; Sinha, 1983 ; Imura et Sinha, 1984 ; Sinha, 1984 ; Demianyk et Sinha, 1987). Leurs hypothèses n'ont cependant pas été souvent vérifiées.

Au niveau du stockage, les contrôles sont orientées généralement vers la mycoflore fongique pour une détermination qualitative (méthode d'Ulster, Muskett et Malone, 1956 *In* : Cahagnier et Richard-Molard, 1997) et/ou quantitative (méthodes classiques de dénombrement par dilutions-ensemencement). La contamination passée ou présente d'un produit par des champignons microscopiques peut également être mise en évidence par des méthodes d'évaluation de la biomasse fongique par le dosage d'un constituant spécifique : l'ergostérol (Cahagnier et Richard-Molard, 1997)

- Aux mycotoxines dont la détection, l'identification et la quantification peuvent être réalisées à partir de nombreuses méthodes dont les plus utilisées, actuellement, sont la chromatographie sur couche mince (CC), la chromatographie liquide haute performance (CLHP) ainsi que des méthodes rapides, simples et sensibles (génie immunologique, ...) permettant la mise en place de l'assurance qualité tout au long des procédés de fabrication (Frayssinet et Cahagnier, 1982 ; Dragacci et Frémy, 1997).
- Aux résidus pesticides dont le dosage peut être effectué par chromatographie en phase gazeuse (Hascoet, 1982).
- Aux souillures animales dont le taux peut être déterminé par le filth-test. Utilisé depuis 1938 aux Etats-Unis d'abord puis dans d'autres pays, le filth-test est une méthode analytique qui permet d'isoler, d'identifier et de comptabiliser les micros-débris contenus dans les produits pulvérulents et semi pulvérulents (Fleurat-Lessard, 1997).
- A certains excréta des insectes, en particulier l'acide urique qui représente le principal produit de fin du métabolisme des insectes. Le séjour de ces déprédateurs, même temporaire, dans une denrée alimentaire, entraîne l'accumulation de l'acide urique dont le dosage peut servir d'index des conditions hygiéniques des céréales et dérivés stockés (Subrahmanyam *et al.*, 1955 ; Venkar Rao *et al.*, 1959, 1960 ; Sen, 1968 ; Sharma *et al.*, 1979 ; Fleurat-Lessard, 1990).

3.5-Spécifications réglementaires des caractéristiques technologiques des blés et dérivés et des contaminants dans l'alimentation.

Ces deux caractéristiques qualitatives des blés et dérivés occupent une place privilégiée dans le monde, la qualité alimentaire par l'innocuité des produits, étant devenu, actuellement, au niveau mondial, un impératif absolu quelle que soit l'utilisation ultérieure, consommation humaine ou animale. Des réglementations pointues ont donc été fixées pour respecter ces nouvelles exigences des utilisateurs.

3.5.1-Qualité technologique.

Bien que dans le monde, l'utilisation de la masse à l'hectolitre (« PS ») est souvent critiquée au niveau scientifique (Laniesz, 1979), cette mesure sert encore de critère de réglementation du taux d'extraction des blés tendres en Algérie (décret exécutif n° 91-572

du 31 décembre 1991) : l'appellation « farine supérieure », produite à un taux d'extraction faible (PS – 8 à PS – 5), repose uniquement sur son aspect blanchâtre. Sur la base de la répartition des matières minérales dans le grain, le taux d'extraction et la pureté des farines sont réglementés en France par le taux de cendres (Roussel et Chiron, 2003), ce qui est le cas des semoules produites en Algérie (Décret exécutif n° 07-402 du 25 décembre 2007, JO n° 80). Par ailleurs, selon le décret exécutif n° 91-572 du 31 décembre 1991, les spécifications de la farine de panification relèvent essentiellement de la valeur boulangère : W alvéographique situé entre 130 et 180 ; rapport de configuration alvéographique P / L compris entre 0,45 et 0,65 ; indice de Zélény : 22 à 30 ; indice de chute compris entre 180 et 280 s ; teneur en eau \leq 15,5%.

3.5.2-Les contaminants dans l'alimentation.

La réglementation fixe, en général, les seuils limites à ne pas dépasser. En l'absence de textes réglementaires, il est utile de faire référence aux avis et recommandations émanant d'organismes officiels qui jouent un rôle dans la fixation des « valeurs seuils ». En Algérie où la réglementation des contaminants n'existe pas encore, la référence est le *Codex Alimentarius*, organisation internationale dans le domaine des échanges de produits alimentaires. La commission mixte FAO- OMS du Codex élabore des normes alimentaires universelles pour la protection du consommateur ; celles-ci sont des orientations et des recommandations d'application facultative mais qui font référence dans de nombreux pays. En Europe, la Commission européenne tient compte des réflexions issues des études du *Codex* pour l'élaboration des textes communautaires. En France, l'AFSSA, qui a repris les activités du CSHPF (Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France) depuis 1999, a pour mission l'évaluation du risque et la charge des activités de recherche et d'appui technique relatifs à l'hygiène des aliments et à la nutrition.

3.5.2.1-Les microorganismes

A ce niveau, la réglementation dans les céréales et dérivés n'existe pas. En France, l'arrêté du 21/12/1979, JO du 19/01/80, applicable pour les pâtisseries, est souvent pris en référence pour les farines et les pains (Roussel et Chiron, 2003). Cependant, en 2001, les exigences en terme de sécurité sanitaire se sont renforcées par les spécifications du Guide de Bonnes Pratiques d'Hygiène (GBPH) (Mérour, 2001 ; Souply, 2004). Au niveau pratique, la qualité microbiologique d'un grain est acceptable s'il comprend moins de 10^4 germes de la flore de stockage par gramme de grain (Cahagnier et Fleurat-lessard, 1996).

3.5.2.2-Les mycotoxines

(Peyruchaud, 2001 ; Anonyme, 2007).

Actuellement, les mycotoxines réglementées par la Communauté Economique Européenne sont les aflatoxines, la désoxynivalénol ou DON, la zéaralénone et les fumonisines. Pour les céréales et dérivés destinés à la consommation humaine, la teneur maximale en aflatoxine B1, reconnue particulièrement dangereuse, est fixée à 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ et à 4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en aflatoxines B1+B2+G1+G2. Pour les céréales infantiles, la réglementation est plus sévère : 1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en aflatoxine B1. Le règlement européen du 19 décembre 2006 (1881/2006) a fixé les taux maximum autorisés de fusariotoxines dans les céréales et dérivés destinés à l'alimentation humaine qui s'avèrent plus élevés: 1250 à 1750 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en DON dans les céréales brutes par exemple. Le Comité Permanent de la Chaîne Alimentaire et de la Santé Animale (CPCASA) l'a modifié et complété le 20 juillet 2007 pour des taux dans

le maïs. Les teneurs maximales en OTA des céréales et dérivés destinés à l'alimentation humaine et en fusariotoxines et OTA dans l'alimentation animale sont fixées sous forme de recommandations. En alimentation animale, les teneurs en mycotoxines sont 10 à 30 fois supérieures à celles autorisées dans les produits destinés à l'alimentation humaine.

3.5.2.3-Les résidus pesticides.

Pour protéger le consommateur, les LMR admissibles suivant le *Codex Alimentarius* dans les céréales brutes destinées à la consommation humaine ou animale sont fixées réglementairement [Directive européenne n°86-362 transcrite en droit français par l'arrêté du 10 février 1989 modifié (juillet 2000)] : des substances précises sont autorisées dans le traitement des céréales brutes, le bromure de méthyle et le dichlorvos étant interdits depuis 2010. Dans les céréales, plus de 200 résidus sont réglementés (Peyruchaud, 2001). C'est ainsi que, par exemple, le *Codex Alimentarius* a fixé la LMR de la deltaméthrine dans le grain à 1mg /kg.

3.5.2.4-Les métaux lourds.

Ils ne sont pas encore réglementés. La Commission européenne a élaboré, en octobre 2000, une proposition de règlement relative au plomb et au cadmium, la valeur seuil du mercure ayant été fixé en 1993 sur avis du CSHPF. Ces recommandations concernent les céréales et dérivés, les légumineuses et légumes secs destinés à la consommation humaine.

3.5.2.5-Les souillures animales

Sur le plan sanitaire, et selon une définition mondialement reconnue (Fleurat-Lessard, 1990), « une farine est considérée comme souillée si elle contient un nombre suffisamment important de particules étrangères, d'origine animale, constituant pour la santé du consommateur un risque ou bien si elle a été produite, conditionnée ou conservée sans précaution vis-à-vis des rongeurs, des insectes ou des acariens qui ont pu l'atteindre directement ou en y déposant leurs œufs ». D'une façon générale, la réglementation n'admet pas la présence de poils de rongeur dans la farine mais, en ce qui concerne les débris d'insectes, la tolérance varie d'un pays à un autre : Aux Etats-Unis, on accepte jusqu'à 50 fragments d'une taille supérieure à 30 µm dans un échantillon de 50 g de farine. D'autres pays tel que la Belgique peuvent avoir des niveaux de tolérance plus

faibles ou ne s'intéressent qu'à une seule catégorie de souillures (Pologne : absence d'acariens vivants). Les autres pays sont soit alignés sur la législation américaine soit ils n'ont aucune tolérance (Fleurat-Lessard, 1997).

IV -Préservation de la qualité des grains stockés.

4.1-Nouvelle approche globale de la protection antiparasitaire intégrée.

Au niveau mondial, cette stratégie de lutte dirigée dans les grains stockés prend de plus en plus d'importance. L'objectif est de constituer des conditions défavorables au développement des prédateurs animaux et des microorganismes par l'utilisation et la

combinaison rationnelle de toutes les techniques et méthodes appropriées ; dans ces conditions, les populations de ravageurs sont maintenues en dessous du seuil de dommage économique en liaison avec les exigences de sécurité et de salubrité exigées pour le produit final (pour les insectes, ce seuil correspond à la densité minimale décelable au contrôle d'agréeage soit 1 insecte/kg). Les techniques de stabilisation, que nous avons présentées précédemment (parag. 2.2.4.1.), permettent la lutte préventive contre la prolifération de ces bioagresseurs, insectes et microorganismes, par le contrôle strict des conditions de température et d'activité d'eau des grains stockés (Fig. 9). Ces paramètres doivent être maintenus en dehors de conditions physico-chimiques permettant la multiplication de certaines espèces d'insectes primaires telles que *S. oryzae* et la croissance des moisissures xérotolérantes. Actuellement, la sécurité des produits alimentaires a pris une telle importance que certains segments du marché (céréales de filière « bio », pour baby-food,...) ne tolèrent ni insecte vivant ni résidus de produits phytosanitaires : les exigences de l'utilisateur final en aval du stockage (transformateurs, consommateurs) orientent les aspects qualitatifs non seulement du point de vue technologique mais de plus en plus vers la « sécurité et salubrité des aliments » (Fleurat-Lessard, 2003 a).

La conservation des céréales est un objectif qui ne peut être atteint que par l'application de précautions et techniques diverses se situant tout le long de la chaîne « semence-stock ».



Figure 9 : Gestion des risques pour la qualité sanitaire des céréales par la détermination de l'état initial des grains, des forces détérioratives et des indicateurs précoces de biodétermination (Fleurat-Lessard et Dupuis, 2007)

4.1.1-Au niveau du champ

La précaution première consiste à cultiver des semences certifiées de variétés adaptées et performantes suivant un itinéraire technique raisonné qui permet l'obtention de plantes

vigoureuses et productives capables d'opposer une certaine tolérance aux agressions.

L'état sanitaire des grains à la récolte doit être préservé par la lutte intégrée contre les prédateurs du champ parmi lesquels

- la punaise des céréales, *Aelia germari* Kuester, doit être combattue dans les gîtes d'hiver (lutte chimique ou, de préférence, ramassage des insectes en hibernation) pour prévenir l'attaque des grains.
- La contamination par le *Fusarium* doit être évitée par des mesures diverses (Caron *et al.*, 2007 ; Desgranges *et al.*, 2007 ; Lemmens, 2007) et, si nécessaire, la lutte chimique (loos *et al.*, 2003). La résistance spécifique et variétale des céréales constitue également un facteur limitatif ou inhibiteur de fusariotoxines.

Par ailleurs, la récolte doit être réalisée avant siccité poussée des grains pour limiter les déprédations et éviter l'égrenage et la cassure, le matériel de récolte et de transport des grains devant être préalablement nettoyés et désinsectisés.

4.1.2-Avant et pendant le stockage des nouvelles récoltes

Au niveau mondial, une démarche d'assurance qualité relative à la fois à la conformité et à la sécurité des produits alimentaires est actuellement appliquée aux grains. Il s'agit de la méthode HACCP (Hasard Analysis Critical Control Point) dont l'objet est l'analyse des dangers et des points critiques pour leur maîtrise (Flayeux, 1999 ; Fleurat-Lessard, 2003 b, 2007) par l'intermédiaire des Guides des Bonnes Pratiques Hygiéniques (GBPH). Cette méthode s'applique aux trois catégories de dangers pouvant menacer la sécurité et la salubrité des produits alimentaires (dangers biologiques, chimiques ou physiques) à différents stades de la filière, depuis le stockage des produits agricoles bruts jusqu'à la distribution des produits finis. L'objectif est l'identification et l'évaluation des dangers pour définir les moyens nécessaires à leur maîtrise (Fig. 10).

Le principe de base de la démarche HACCP pour les bonnes pratiques hygiéniques en organisme stockeur (OS) est de prendre toutes les précautions raisonnables pour éliminer les dangers ou réduire leur risque d'apparition à un niveau acceptable. Cela implique de pratiquer la gestion raisonnée du risque *à priori* en évitant les traitements d'assurance en aveugle ou des mesures correctives en cas d'urgence ; cette stratégie favorise l'utilisation des méthodes préventives de lutte physique (Fleurat-Lessard et Vincent, 2004) ou de la fumigation. La mise en pratique de cette démarche préventive nécessite la prédiction des situations à risque et la protection antiparasitaire intégrée (PAI). Des modèles de prévision du devenir des agents biologiques d'altération et des contaminants, en fonction du temps et des conditions de stockage (température, humidité relative ou activité de l'eau dans les grains, activité des insectes), sont nécessaires à la prédiction des situations à risques.

L'établissement d'un système de surveillance est nécessaire pour permettre des actions correctives précoces :

- Les silos doivent être dotés de capteurs de chaleur et d'humidité mais également de sondes acoustiques de surface permettant la détection de la présence d'insectes et l'identification automatique de l'espèce détectée (Fleurat-Lessard, 2003 b).
- Les hangars, les entrepôts et les usines agroalimentaires doivent être protégés des nuisibles (blattes, rongeurs, insectes) en empêchant leur pénétration et leur propagation à l'intérieur des bâtiments ainsi que leur développement (nettoyage et élimination des déchets, poussières et refuges) (Grolleau et Gramet, 1982 ; Bitner, 1991).

Une stratégie de prévention par protection régulière dans le temps est moins coûteuse et

Plus efficace que des opérations de lutte curative de grande envergure pour des situations

désastreuses caractérisées par des pertes pondérales et qualitatives importantes.



Figure 10 : Points de danger au niveau de la récolte et de l'entreposage (Fleurat-lessard, 2007)

4.2-Approche intégrée de la maîtrise de la qualité des stocks par les systèmes experts.

Un système expert à base de connaissance a été élaboré à l'INRA de Bordeaux (Ndiaye, 2001) dans le but d'une maîtrise parfaite de la préservation de la qualité des céréales stockées (Fig.11). Ce système a pour objectif principal la construction d'un Système informatisé d'Aide à la Décision (SAD), permettant de transmettre la connaissance des experts au niveau de l'utilisateur (le responsable qualité en OS) par les moyens modernes de communication (CD-Rom, Internet,...). La base de données, scientifique et technique, construite pour l'orge de brasserie, intègre la connaissance des différents experts du domaine ainsi que des règles de raisonnement logique, des arbres de décision, des modèles de prévision, des données empiriques,... La partie « intelligente » du système est construite à partir de l'ensemble des paramètres de la qualité initiale de la céréale, des moyens de stockage, des moyens de conservation disponibles,... Bien que le premier SAD ait concerné l'orge de brasserie, la conception modulaire originale de chaque partie de ce système permet de modifier le contenu des bases de connaissances et de reprogrammer l'interface utilisateur avec de nouveaux critères (pour le blé panifiable, par exemple, ou autre céréale stockée) (Fleurat-Lessard, 2003 a).

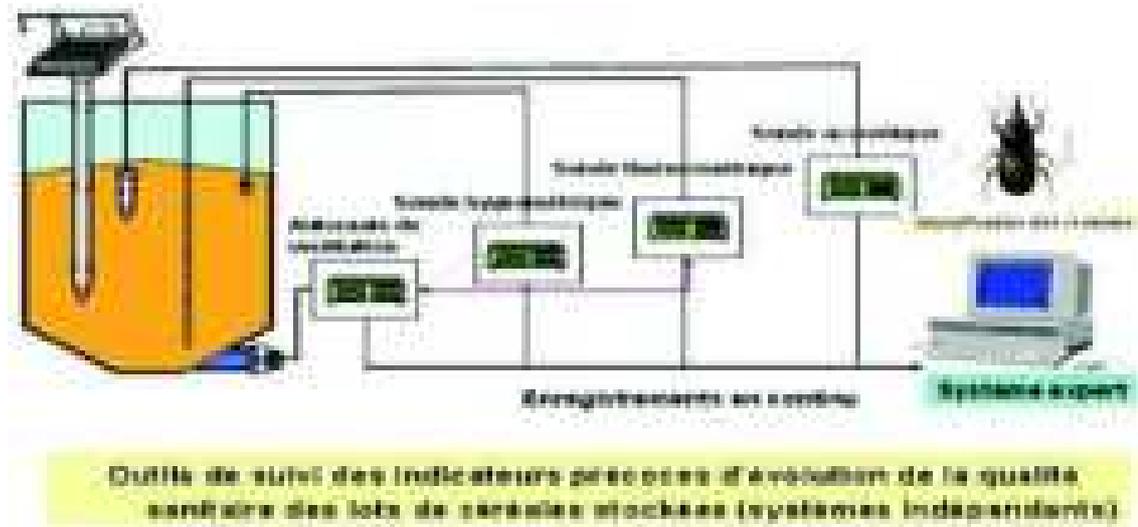


Figure 11 : Système d'aide à la Décision informatisé : Fonction de pilotage des indices « précurseurs » d'un risque de détérioration de la qualité (Fleurat-Lessard, 2007).

Les avantages économiques pour l'utilisateur de tels systèmes sont déjà pleinement exploités en Australie, aux Etats-Unis, au Canada et en Chine. Cependant, ce système, particulièrement performant dans les pays grands producteurs de céréales, n'est pas à conseiller en Algérie dans les conditions actuelles :

- La production céréalière est assez basse,
- Les céréales commercialisées, issues de lots locaux et importés, sont de qualité hétérogène ce qui ne permet pas un classement rationnel,
- Les moyens de conservation sont limités,
- Les moyens de contrôle, rapides et fiables, des grains et des silos (capteurs) sont peu disponibles alors que les sondes acoustiques pour la détection des insectes sont inexistantes.

Les conditions ne sont donc pas remplies pour l'application du SAD qui deviendra possible et souhaitable lorsque la production nationale s'élèvera quantitativement et significativement ; une amélioration nette mais encore insuffisante a été constatée ces dernières années grâce au programme d'intensification céréalière mis au point par le MADR.

PARTIE EXPERIMENTALE

L'interaction entre les agents de biodétérioration des grains est complexe et peut aboutir à des effets variables selon les conditions de stockage et la sensibilité spécifique et variétale des céréales à l'égard de ces bio agresseurs (Haryadi, 1991 ; Fourar, 1994 ; Fourar et Fleurat-lessard, 1997). Nous avons donc envisagé une expérimentation en vue de mettre en évidence des caractéristiques des différentes céréales qui prennent la part la plus importante dans :

- La résistance spécifique puis variétale des céréales à l'attaque des grains après récolte par un insecte ravageur primaire.
- L'influence de ce bio agresseur sur l'évolution des caractéristiques biologiques, sanitaires et technologiques des blés au cours du stockage à long terme.

Ce deuxième volet a été étudié dans différentes conditions de stockage plus ou moins favorables à la bonne conservation des grains : température favorable au développement des insectes (23° C, 25°C), humidités relatives diverses (défavorable : HR 65%, peu favorable : HR 75%, favorable : HR 85%). Nous nous sommes appliqués à cerner les conditions limites de bonne conservation de variétés algériennes et françaises de blé, en un dispositif expérimental conçu pour une comparaison de la cinétique d'évolution des caractéristiques physico-chimiques, sanitaires et technologiques de variétés, artificiellement infestées. Les critères retenus ont été analysés statistiquement pour mettre en évidence les facteurs physico-chimiques responsables des variations de la sensibilité des variétés de blé à l'attaque par les déprédateurs étudiés d'une part ainsi que l'effet de combinaison de ces facteurs sur les paramètres de développement des bio agresseurs, d'autre part. Le modèle d'insecte étudié a été le charançon du riz, *Sitophilus oryzae* (L.) (*Coleoptera* : *Curculionidae*), espèce particulièrement nuisible aux stocks de céréales et se développant sous forme cachée à l'intérieur du grain.

Les questionnements scientifiques ont été les suivants :

- Quelle est l'amplitude de la variabilité de la sensibilité spécifique et variétale des céréales au charançon *S. oryzae* ?
- Existe-t-il des variétés de blé qui présentent un niveau de tolérance élevé au développement de *S. oryzae* ?
- La sensibilité du blé tendre à la biodégradation de la qualité des grains causée par le charançon *S. oryzae* peut elle être synthétisée dans un indice global construit à partir des variables ayant l'impact le plus élevé sur l'amplitude de la variation ?

L'expérimentation effectuée, comprend deux parties distinctes :

- A. Des essais préliminaires d'orientation méthodologique pour la comparaison de la sensibilité spécifique et variétale de différentes céréales au charançon du riz, *S. oryzae*, réalisés dans des conditions d'humidité relative défavorables à la multiplication du charançon (HR = 65-68 %) sur des céréales produites en Algérie dans les mêmes conditions de culture en comparaison à des lots témoins non infestés.

- B. Une étude en conditions contrôlées de laboratoire sur deux séries d'expériences parallèles constituées par des variétés de blé tendre produites en France ; celles-ci ont été stockées dans deux conditions d'humidité relative associées à un niveau de risque de détérioration qualitative différent (75 et 85%), avec dans chaque condition d'hygrométrie, une série infestée par *S. oryzae* comparée à une série sans insecte.

A-PREMIERE PARTIE. ESSAIS PRELIMINAIRES D'ORIENTATION METHODOLOGIQUE.

L'ensemble des espèces et variétés étudiés dans ce premier chapitre proviennent de la station expérimentale de l'ITGC (Institut Technique des Grandes Cultures) d'El Harrach. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement au blé dur et au blé tendre, céréales stratégiques en Algérie pour la consommation humaine, ainsi qu'au triticale pour son aptitude à remplacer le maïs dans la ration alimentaire du bétail ou dans la fabrication des aliments composés pour les animaux (Laroche, 1981 ; Dib *et al*, 2002).

Deux séries d'essais ont été effectuées portant sur :

1. La variabilité de la sensibilité spécifique et variétale de céréales au ravageur primaire des stocks, *S. oryzae* L.
2. L'évolution des qualités alimentaires et technologiques des blés sous l'effet de ce même déprédateur, particulièrement nuisible aux céréales produites ou stockées en climat méditerranéen.

1-MATERIEL ET METHODES

1-1-Etude 1. Variabilité de la sensibilité spécifique et variétale de céréales (blé tendre, blé dur et triticale) à l'égard de *S. oryzae* L.

1-1-1-Matériel végétal

Deux variétés par espèce de céréale et de caractéristiques physicochimiques connues ont été étudiées. L'essai réalisé a porté sur les variétés suivantes produites à l'ITGC

- Blé tendre : *Kau** et *Mahon démias***
- Blé dur : Hedba 3, AWLP, Bit* et Waha**
- Triticale : Lad 183, Porsas 2* et Juanillio***

* Variété « lignée » en voie de sélection, dans le cadre d'un essai national de comportement agrotechnologique et d'adaptation (2^{ème} année) à l'ITGC

** Variété témoin cultivée à grande échelle en Algérie.

*** Variété témoin inscrite dans le catalogue des céréales cultivées en Algérie.

Dès la réception, le matériel végétal a été désinsectisé au tétrachlorure de carbone (450 mL m⁻³) disposé dans un béccher à la surface des grains, en enceinte étanche. A l'issue de ce traitement insecticide, les échantillons ont été ensuite stockés à température ambiante dans un local propre, sain et sec après un nettoyage manuel visant à éliminer les

impuretés pouvant influencer sur les résultats des essais (matières inertes, grains échaudés, cassés, punaisés, autres céréales).

1-1-2-Insecte modèle étudié dans la partie expérimentale : le charançon du riz, *Sitophilus oryzae* L.

Le Charançon du riz est un coléoptère de la famille *Curculionidae*, sous-famille *Calandrinae*, tribu *Calandrini* et genre *Sitophilus*. Ce dernier comprend trois espèces : *S. oryzae* L., *S. granarius* L. et *S. zeamais* Motsch.

1-1-2-1-Morphologie et biologie du développement de l'insecte (*S. oryzae* L.).

L'œuf de *S. oryzae* est piriforme et mesure, d'après Lepesme (1944), 0,65 à 0,70 mm. La larve de forme globuleuse est apode, contrairement à celle des autres coléoptères infestant les céréales stockées ; elle se trouve donc dans la nécessité de se développer à l'intérieur des grains.

L'adulte, d'une longueur moyenne de 3 mm, est de couleur brun à brun-roux avec deux tâches rousses sur chaque élytre ; il présente un pronotum pourvu de ponctuations arrondies (Fig. 12).

Selon Steffan (1978), les charançons sont très sensibles à la sécheresse : l'humidité relative doit être supérieure à 70% pour un développement optimal; *S. oryzae* ne pond pas dans des grains dont la teneur en eau est inférieure à 9% ou lorsque la température est proche de 15°C ou dépasse 32,5-35°C. Ces données montrent l'intérêt de stocker des grains secs dans des locaux frais et secs. Toujours d'après le même auteur, les conditions optimales pour la croissance de cette espèce sont de 28° C et 70% H.R. ; *S. oryzae* peut se développer à 13-15°C jusqu'à 34° C lorsque la teneur en eau des grains est supérieure à 14%.

Une femelle de *S. oryzae* pond en moyenne 300 œufs avec un maximum pouvant dépasser 500. Avant de pondre, à l'aide de son rostre, elle fore un trou dans le grain dans lequel elle dépose un œuf. Le trou est ensuite rebouché d'une sécrétion mucilagineuse qui durcit à l'air. Le rythme de ponte est assez élevé de sorte qu'une jeune femelle peut pondre 10 œufs par jour à 32°C au début de sa vie, pour finir après 6 mois, à 1 ou 2 œufs tous les deux jours.



Figure 12 : *Sitophilus oryzae* L. (2 adultes sur les côtés) comparé à *S. zeamais* Motsch.

A 25°C et à une humidité relative de 70%, les adultes peuvent vivre en moyenne 4 mois, leur longévité pouvant atteindre 12 et même 24 mois. En 28 jours, dans des conditions optimales, une population de *S. oryzae* sera multipliée par 25 (Anglade, 1970 ; Steffan, 1978).

1-1-2-2-Distinction des sexes chez *Sitophilus oryzae* L.

En nous référant aux travaux de Richard *x* (In : Nkouka, 1974), la distinction des sexes de *S. oryzae* est possible :

- En exerçant une légère pression sur la face abdominale des insectes vivants ; le dernier tergite abdominal protégé par le pygidium ressort différent chez les deux espèces.
- En observant les derniers sternites abdominaux qui sont plus courbés ventralement chez le mâle que chez la femelle.

D'après Lepesme (1944), le rostre du mâle est plus épais, plus court et plus profondément ponctué que celui de la femelle.

1-1-2-3-Dégâts.

Il faut distinguer les denrées pouvant servir à l'alimentation des adultes de celles où la ponte est possible. En effet, les œufs sont pondus dans les produits durs pouvant fournir, d'une part, un appui à la femelle adulte pour creuser et, d'autre part, un abri solide à la larve apode ; la préférence va vers les céréales en grains (orge, blés, seigle). Les dommages sont causés par l'adulte mais surtout par la larve ; ils sont caractéristiques de l'espèce : grains évidés, perforés d'un trou à contour irrégulier d'où est sorti l'adulte.

1-1-2-4-Origine des insectes utilisés

L'infestation artificielle est réalisée au laboratoire du Centre de Recherche des Industries Agro-Alimentaires (CRIAA), annexe de l'Université de Blida à partir d'un élevage de masse en chambre climatisée (25°C et 70% HR). Les insectes utilisés proviennent d'une souche de *S. oryzae* L. de l'unité MycSA du Centre de Recherches INRA de Bordeaux (France). Nous avons utilisé des jeunes couples, émergés depuis une semaine environ et prélevés en cours d'accouplement. Cette technique permet de réduire d'une part, le risque d'erreur dans la détermination du sexe des charançons et d'autre part, la variabilité entre les résultats d'un essai où le nombre de couple installé par modalité est limité.

Pour obtenir les parents accouplés, un grand nombre d'adultes d'âge connu ont été disposés dans une boîte en plastique de grande taille (30 × 30 × 10 cm), munie d'un couvercle aéré, dans laquelle a été placée au préalable une mince couche de maïs concassé grossièrement. Les boîtes ont été mises à incuber à l'obscurité dans une étuve ventilée réglée à 25°C et 70% HR. A partir du deuxième jour, les adultes accouplés ont pu être facilement prélevés à la surface du substrat à l'aide d'une pince brucelle souple. Ce mode opératoire « standard » de prélèvement de couples d'insectes a été, par la suite, appliqué à l'ensemble des essais ultérieurs.

Dans ce premier essai, chaque lot de blé, constituant une « unité » expérimentale, a été infesté par cinq couples de charançons qui ont été maintenus pendant 21 j dans le grain, durée au terme de laquelle ils ont été retirés par tamisage léger avant d'être éliminés.

1-1-3-Constitution des échantillons élémentaires homogènes et protocole expérimental

Après le nettoyage des grains, l'homogénéisation et la réduction de chaque lot variétal en échantillons ont été réalisées à l'aide d'un échantillonneur/réducteur conique en vue de constituer les unités élémentaires pour l'expérimentation ; cet appareil est conseillé par les organismes de normalisation français et algérien (AFNOR, IANOR). Ainsi, pour chacune des variétés, trois échantillons élémentaires de 100 g ont été préparés puis placés dans des boîtes en polystyrène cristal de dimensions (13,5 × 8 × 5) cm, munies d'un couvercle à grillage fin (ouverture de maille : 0,250 mm) permettant l'aération. Ces échantillons ont été disposés en randomisation totale dans une étuve réglée à 25°C et 70% HR où ils ont été maintenus pendant 48 h avant l'infestation, pour atteindre l'HR d'équilibre et des niveaux équivalents d'activité de l'eau dans les grains. Après ce délai, 5 couples de charançons ont été déposés dans chaque répétition où ils ont séjourné pendant 21 jours, au terme desquels ils ont été éliminés du milieu par un tamisage léger. Les échantillons ont ensuite été remis immédiatement dans l'étuve en randomisation totale. Ce mode opératoire « standard » d'infestation a été appliqué à l'ensemble des essais ultérieurs, le nombre de couple et la durée d'infestation variant, d'un essai à l'autre.

A partir de 30 jours après le début de l'infestation, le contenu des boîtes a été tamisé pour suivre l'émergence de la descendance de première génération (F1) : les imagos ont été enlevés du milieu et dénombrés quotidiennement jusqu'à la fin des émergences, ce qui a permis d'éviter toute réinfestation par les adultes de F1. L'essai a été considéré comme terminé lorsque, pendant cinq jours consécutifs, il n'a pas été constaté de nouvelle émergence d'adultes.

Pour chaque répétition, les données observées ont permis d'évaluer le nombre total de descendants et la durée moyenne de développement.

1-1-4-Variables et indicateurs de sensibilité étudiés

1-1-4-1-Paramètres biologiques et variables calculées

- Effectif : EFF

C'est le nombre total de descendants produits par 5 femelles (5 couples) dans les conditions expérimentales décrites précédemment.

- Durée de développement des insectes : DD

Ce paramètre, décrit par Dobie (1974) et appliqué par Haryadi (1991) et Fourar (1994), est calculé comme la durée écoulée à partir du milieu de la période de séjour des parents jusqu'au moment où 50% de l'effectif total des descendants a été dénombré.

La méthode de calcul de la durée de développement que nous avons appliquée à *S. oryzae* est illustrée par la figure 13 (Haryadi, 1991).

- Indice de sensibilité : IS

L'indice de sensibilité à l'attaque de *S. oryzae*, calculé d'après la méthode de Dobie (1974), est un paramètre basé sur les deux critères les plus directement dépendants de la tolérance intrinsèque des céréales aux attaques des insectes des stocks : durée de développement et nombre de descendants. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\text{Indice de sensibilité} = (\text{Ln } F / D) \times 100$$

Où F est le nombre de descendants et D, la durée de développement (exprimée en j).
(Ln = logarithme népérien)

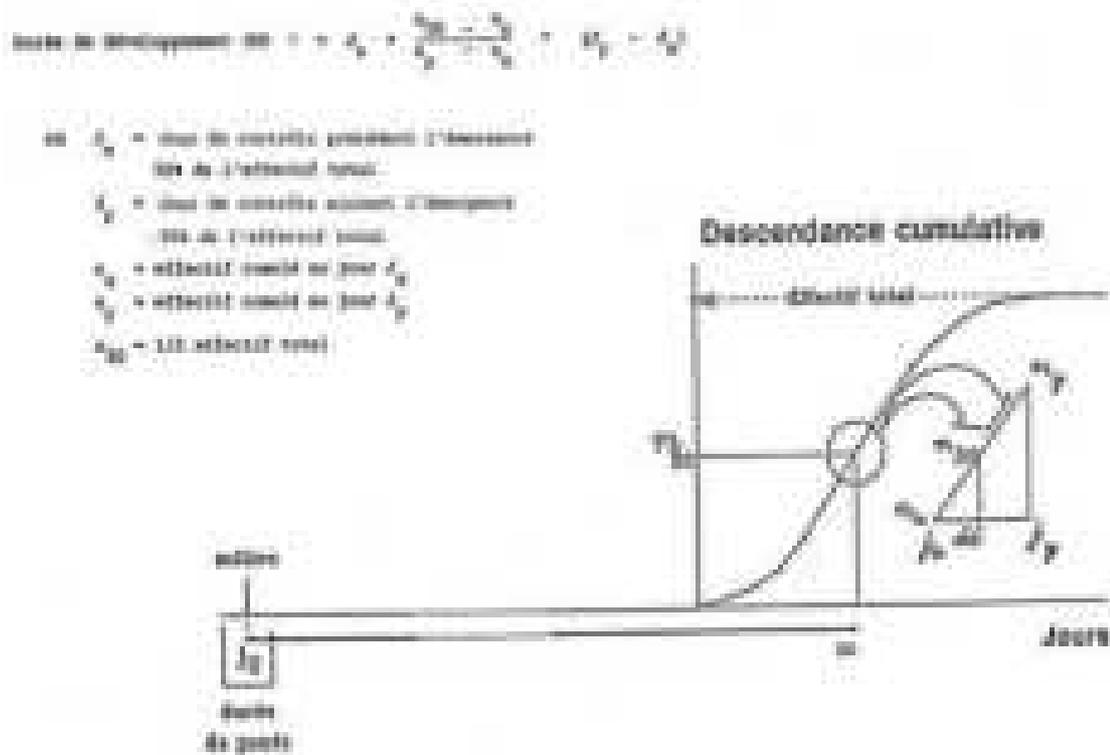


Figure 13 : Méthode de calcul de la durée de développement

1-1-4-2-Paramètres physico-chimiques

La caractérisation de ces paramètres pour chaque espèce ou variété, à mettre en relation avec la sensibilité spécifique ou variétale à l'infestation par les insectes, a porté sur les cinq variables explicatives suivantes : teneur en eau, taux de cendres, teneur en protéines, teneur en cellulose et dureté des grains.

Ces variables ont été déterminées soit par des méthodes normalisées algériennes, soit par application d'un mode opératoire adapté à un appareillage particulier. Il est à signaler que les normes algériennes « NA » sont en concordance technique avec les normes françaises « NF » (Tabl. 6).

1-1-5-Analyses statistiques

Selon le cas, les observations recueillies ont été soumises à l'analyse de variance selon le plan de randomisation totale à 1 ou 2 facteurs étudiés. Les différences significatives entre les moyennes ont été établies par l'analyse des groupes homogènes de Newman – Keuls, au seuil de probabilité P inférieur ou égal à 0,05. Pour déterminer la relation entre les caractéristiques physiques et chimiques des grains et les paramètres mesurés, des analyses de corrélations simples ou multiples ont été effectuées (logiciels StatITCF et /ou XLStat).

1-2-Etude 2 : Evolution des qualités alimentaires et technologiques des blés sous l'effet du ravageur *S. oryzae* L.

Deux séries d'essais ont été effectuées sur blés tendres et blés durs :

- Une série à échelle réduite (masse des grains/ traitement = 300 g)
- Une série à échelle moyenne (masse des grains/ traitement = 1400 g)

1-2-1- Matériel végétal

1-2-1-1-Pour l'essai à échelle réduite

L'étude a porté sur cinq variétés de blé tendre et de blé dur :

- Blé tendre : MINCH/3 BCN *

BOW/MOR/BAU *

ANZA **

HD 1220 **

MAHON DEMIAS ***

- Blé dur : ADA/GUI/SEMITO *

MBB/LAHN'S *

M 1084*

ADA/PRF/OFANTO *

VITRON **

* Variété « lignée » en voie de sélection dans le cadre d'un essai national de comportement agro technologique et d'adaptation (2ème année) de l'ITGC.

** Variété cultivée à grande échelle en Algérie, jouant le rôle de témoin dans l'essai national de comportement agro technologique et d'adaptation (2ème année) de l'ITGC.

*** Variété cultivée à grande échelle en Algérie fournie par l'OAIC à partir de la collecte de blé tendre.

Ces 10 variétés de blé soumises à l'expérimentation ont été choisies sur la base de leur composition biochimique et de leur qualité technologique que nous avons voulues distinctes et que nous avons mesurées au préalable ; elles ont été stockées au niveau du CRIAA, annexe de l'Université de Blida, après un traitement insecticide sans rémanence (cf. 1.1.1). Les grains ont été ensuite aérés puis disposés dans des sacs en papier et conservés dans un local frais et sec.

A l'exception de la variété *Mahon démias* fournie par l'OAIC, les variétés soumises à l'expérimentation ont été produites dans les mêmes conditions de culture, la même campagne, au niveau de l'ITGC, Oued Smar.

1-2-1-2-Pour l'essai à échelle moyenne

Dans ce second essai, l'expérimentation a porté sur la comparaison de trois variétés de blé tendre et de blé dur :

- Blé tendre : A440 * (origine France)

C5327 *(origine France)

HD 1220 ** (origine locale)

· Blé dur : S 1306 * (origine France)

PROTOBELLO * (origine Italie)

VITRON ** (origine Espagne)

* Variété « lignée » en voie de sélection dans le cadre d'un essai national de comportement agro technologique et d'adaptation (2ème année) de l'ITGC.

** Variété cultivée à grande échelle en Algérie, jouant le rôle de témoin dans l'essai national de comportement agro technologique et d'adaptation (2ème année) de l'ITGC.

Les échantillons ont été tamisés et nettoyés pour éliminer les impuretés pouvant influencer sur les résultats des essais (matières inertes, graines étrangères, grains piqués, grains cassés, grains punaisés). Les grains ont été ensuite stockés dans un local désinsectisé et propre.

1-2-2-Espèce infestante

La population du charançon de riz, *S. oryzae* L., servant à l'infestation artificielle est issue de la même souche ayant servi au premier essai. L'âge des insectes utilisés était compris entre une et trois semaines.

1-2-3-Préparation des échantillons

1-2-3-1-Pour l'essai à échelle réduite

Avant l'infestation, les grains des traitements, au nombre de 30 pour chacune des espèces (blé tendre, blé dur), ont séjourné 48 h dans une étuve ventilée réglée à 25°C et 70% H.R de sorte à « égaliser » le niveau d'activité de l'eau (A_w) dans les grains des différentes variétés.

Cette précaution a été prise pour que la siccité du milieu alimentaire ne constitue pas un facteur limitant au développement des insectes.

Six adultes, prélevés en cours d'accouplement, ont été disposés dans des boîtes en plastique ayant les mêmes dimensions que celles utilisées dans le précédent essai ; l'échantillon a été fixé à 300 g de grains de chacune des variétés de blé tendre ou de blé dur avec un nombre de répétitions égal à trois par traitement.

Deux niveaux « d'infestation », par répétition de 300 g de blé, ont été comparés :

- F_0 : Pas d'infestation artificielle.
- F_1 : Infestation artificielle par trois couples de *S. oryzae*.

Après infestation, les couples ont été maintenus 21 jours dans le milieu alimentaire, puis ils ont été éliminés par tamisage (tamis à ouverture de maille o.m. 2 mm).

L'évolution des caractéristiques analytiques des différents traitements a été suivie dans le temps à partir d'échantillons représentatifs, prélevés de façon correcte selon un calendrier déterminé d'après la connaissance de la biologie du développement de *S. oryzae* sur blé :

- Premier prélèvement : 40 jours après infestation ou T_1 , temps d'émergence des premiers adultes de F_1 dans les conditions de l'essai.

- Deuxième prélèvement : 60 jours après infestation ou T₂
- Troisième prélèvement : 90 jours après infestation ou T₃

A chaque date de prélèvement, le dénombrement des insectes adultes émergés a été effectué après le tamisage de la totalité des grains de chaque répétition (tamis o.m. 2 mm). Le nombre enregistré a constitué l'effectif enregistré aux échéances T₁, T₂ ou T₃. L'opération suivante a été le prélèvement d'un échantillon représentatif de chacun des traitements pour permettre la détermination des paramètres qualitatifs et de leur évolution respective dans le temps.

Les boîtes contenant les échantillons expérimentaux ont été remises dans l'étuve après chaque date de contrôle, dans les conditions de l'expérience (25°C, 70% H.R), en randomisation totale.

Ce mode opératoire a été appliqué dans l'essai suivant.

1-2-3-2-Pour l'essai à échelle moyenne

A partir de chaque échantillon variétal réceptionné de masse assez élevée (12 kg), des prélèvements élémentaires ont été effectués à l'aide de l'échantillonneur conique.

Chaque variété de blé (tendre ou dur) testé a été réduite en échantillons, de masse 1,4 kg, que nous avons disposés dans huit bocaux en verre, de 2 L de capacité, obturés par un tissu à mailles fines permettant l'aération et empêchant la sortie ou l'entrée des insectes. Les bocaux ont été disposés en randomisation totale dans une étuve réglée à 25°C et 75% HR cinq jours avant l'infestation, de sorte que les grains amorcent un équilibre avec l'HR de l'étuve.

Le mode opératoire relatif à l'infestation, à l'élimination des couples de parents et au dénombrement des insectes émergés aux différents temps de prélèvement est identique à celui de l'essai précédent, les points distincts concernant :

- Le nombre de couples de charançons servant à l'infestation fixé à 2 dans 4 répétitions de chaque variété. Les quatre autres répétitions ont constitué la série de « traitements » témoins.
- Le temps de séjour des parents insectes égal à 15 jours.
- Le dénombrement de la descendance à partir de l'infestation : T₁ : 30 jours, T₂ : 60 jours, T₃ : 90 jours.

Dans cet essai, une analyse technologique a été introduite : la masse à l'hectolitre ou « PS ». Celle-ci a été effectuée au démarrage de l'expérimentation ainsi qu'à chaque prélèvement, immédiatement sur le traitement tamisé ; l'opération a été suivie du prélèvement des échantillons représentatifs destinés aux analyses et tests expérimentaux prévus.

1-2-4-Paramètres étudiés

Selon l'espèce céréalière expérimentée, la masse de grain disponible et les prélèvements nécessaires pour réaliser les analyses, une série de paramètres biologiques, physico-chimiques et technologiques ont été déterminés dans différents laboratoires spécialisés : CRIAA / Université de Blida ; Laboratoire Physiologie Végétale, Département Agronomie, Blida ; Laboratoire de Technologie des céréales, ITGC, El Harrach ; Laboratoire central SAIDAL, Dar El Beida ; Laboratoire Sciences du sol, INRA, Mehdi Boualem, Baraki ; Laboratoire Central de l'OAIC, Chéraga, Alger.

Les analyses et leurs références sont incluses dans le Tableau 6.

1-2-4-1- Caractéristiques physico-chimiques des grains.

L'objectif était de mesurer certains paramètres qui pouvaient influencer sur la biologie des insectes (teneur en eau, dureté des grains, masse de 1000 grains, calibrage, mitadinage du blé dur, richesse en nutriments) et l'évolution de certains dans les traitements infestés. Il s'agit de

- De la teneur en eau des grains
- De la dureté des grains
- De la masse de 1000 grains (ou PMG)
- Du calibrage des grains
- Du mitadinage du blé dur
- De la teneur en matières minérales
- De la teneur en azote total
- De la teneur en matières grasses totales
- De la teneur en cellulose brute.

1-2-4-2- Evaluation de l'état sanitaire des grains.

L'état sanitaire concerne l'effectif des insectes infestant les traitements dans le temps, l'aspect microbiologique quantitatif et qualitatif et certaines caractéristiques liées à la vigueur des grains et à leur état d'infestation et d'infection (germination, acidité grasse, acide urique).

- L'analyse entomologique.

Celle-ci a consisté à dénombrer, à chaque prélèvement, les insectes émergés par tamisage des traitements sur tamis à ouverture de maille de 2,00 mm.

- Le contrôle microbiologique. Celui-ci a concerné l'aspect qualitatif par la méthode d'Ulster puis isolement et repiquage des espèces fongiques sur milieu PDA (Potato-Dextrose-Agar) pour l'identification ultérieure des genres à partir des clés de détermination disponibles (Multon, 1982 ; Cahagnier, 1997 ; Cahagnier et Richard-Molard, 1997 ; Champion, 1997). L'aspect quantitatif a été évaluée par la méthode classique normalisée NA 761/1990 relative au dénombrement par dilutions-ensemencements.
- L'essai de germination
- Le dosage de l'acidité grasse
- Le dosage de l'acide urique

L'acide urique a été déterminé par spectrophotométrie (520 nm) d'une solution issue de l'échantillon infesté par comparaison avec une solution témoin (eau distillée) et une solution de référence de concentration connue en acide urique. L'extraction de cet acide à partir de grains infestés a été réalisée à l'aide d'acétate de sodium 5% par mélange intime pendant 60 mn à 40°C puis centrifugation de la solution à 2000 tr/mn pendant 5 mn.

1-2-4-3- Caractéristiques technologiques

Suivant l'âge des grains, leur état sanitaire et les conditions de stockage, la qualité technologique des blés évolue. Nous nous sommes appliqués à mesurer cette évolution, dans les conditions de nos essais, à partir des paramètres technologiques suivants :

- Masse à l'hectolitre ou « poids spécifique » (PS)

- Mouture et taux d'extraction
- Caractéristiques rhéologiques
 - Farines de blé tendre : Essai à l'alvéographe
 - Semoules de blé dur : Essai au mixographe
- Indices de coloration des semoules de blé dur(indice de jaune, indice de brun)

Ces indices ont été mesurés à partir d'un colorimètre (longueur d'onde 293 nm) périodiquement étalonné. Dix mesures successives ont été effectuées par traitement.

- Indice de chute pour la détermination de l'activité amylolytique des grains.

1-2-5-Analyses statistiques

Les observations obtenues ont subi une analyse de variance selon le plan de randomisation totale à 1 ou 3 facteurs et les différences significatives entre les moyennes ont été établies par l'analyse des groupes homogènes de Newman – Keuls au seuil de probabilité P inférieur à 0,05.

Des analyses de corrélations simples ou multivariées (StatITCF et /ou XStat) ont été effectuées et la relation entre les caractéristiques physiques et chimiques des grains et les paramètres mesurés a été étudiée. Enfin, les interactions entre les variables de l'essai à échelle moyenne ont été mises en évidence grâce à l'analyse en composantes principales (ACP) sous la forme d'un diagramme en biplot.

ANALYSE	METHODE	REF. ALGERIE
1. Analyse entomologique		
Détermination des insectes étudiés	Méthode Ouryou NF 4 2074	ANOR, 1982
2. Analyse microbiologique		
2.1. Quantités		
- % d'eau comprise	Méthode Ouryou	Orangier et Rouss MAY, 1987
- Distribution des grains	NF 7 101 198	ANOR, 198
2.2. Contamination microbienne		
2.2.1. Germes		
- Total bactérien	Méthode NF4	NFA, 198
3. Analyses physico-chimiques		
3.1. Dosage de l'eau	NF 1102 / 80	ANOR, 198
3.2. Dosage des protéines	Méthode de DUMAS Passy (1954)	NORSA
3.3. Méthode de l'azote	NF 11 / 198	NORSA
3.4. Méthode colorimétrique du PHO	Méthode nationale Algérie CSC 871	ANOR, 198
3.5. Dosage des protéines		ANOR, 2011
3.6. Mesurage du pH du	NORSA (1982), Méthode de	ANOR, 198
3.7. Dosage de l'acide libre	Méthode Ouryou, NF 1102-1982	ANOR, 198
3.8. Détermination du sucre de maltose	Méthode ANOR, NF 110 198	ANOR, 198
3.9. Dosage des sucres	NF 100-73	ANOR, 198
3.10. Dosage de la cellulose	de Mearns, NF 1013 / 198	ANOR, 198
3.11. Dosage de l'amidon grossier	NF 1102 1982	ANOR, 198
3.12. Dosage de l'amidon fin	Appareil de Mearns (1926)	Mearns, 1927
4. Colères technologiques		
4.1. Vitesse de séchage de l'eau		
- Séchage naturel grain à 10% H ₂ O	AACQ, méthode 20-82	ANOR, 1982
- Séchage par air chaud	Boiler, four, gaz, élévateur à l'air chaud ou de dur	Méthode de l'ANOR
- Taux d'humidité	Essai de séchage à 50°C pendant 24 heures	ANOR, 1982
4.2. Perte d'azote du grain		
- Séchage à 50°C à l'air chaud	NF 1102/80	ANOR, 198
- Séchage à 50°C au four	Méthode AACQ 24-82	ANOR, 198
4.3. Indice de couleur de l'air à 50°C	Dosage colorimétrique (spectrophotomètre)	ANOR, 198
4.4. Indice de dureté de l'air à 50°C	NF 1102/80	ANOR, 198
5. Analyses statistiques***	ANOR	Méthode de l'ANOR-ANOR ANOR, 1982

Tableau 6 : Liste des paramètres biologiques et technologiques (en tant que variables entrant dans la variabilité de la tolérance des grains aux attaques d'insectes) et référence des méthodes d'analyse

* Norme Française **Norme nationale Algérienne ***Norme d'Entreprise algérienne

**** Analyses statistiques avec logiciels XLstat et StatITCF

2-RESULTATS ET DISCUSSION

2-1-Etude 1 : Variabilité de la sensibilité spécifique et variétale de céréales (blé dur, blé tendre, triticale) à l'égard de *Sitophilus oryzae*.

2-1-1-Caractéristiques qualitatives des variétés soumises à l'expérimentation.

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

Les résultats obtenus montrent que les variétés céréalières soumises à l'expérimentation ont présenté une composition biochimique et des caractéristiques physico-chimiques convenables pour servir de substrat à l'insecte ravageur primaire choisi (Tabl.7) à l'exception de la teneur en eau qui était assez basse. La gamme des teneurs en protéines des espèces et variétés étudiées pour l'expérimentation était comprise entre 11,7 et 15,1 % (sur base matière sèche, MS). La valeur la plus élevée a été enregistrée pour la variété de blé tendre *Mahon demias* (15,1%).

La mise en évidence de l'importance des critères d'état physico-chimiques du grain sur la sensibilité aux attaques de l'insecte ravageur modèle choisi a constitué un des objectifs de l'étude comparative décrite ci –après.

Espèce	Variété	Teneur en eau (%)	Protéines (% MS)	Cendres (% MS)	Durée (h)	Cellulose (% MS)
Blé dur	BDV1 Maha Zarab	11,1	11,28	1,08	14,17 (0,34) B	1,74
	BDV2 Tendres	11,1	11,54	1,07	14,09 (0,01) A	1,73
Blé tendre	BDV1 Esa	11,1	15,1	1,08	14,21 (0,24) B	1,69
	BDV2 Mahon demias	11,1	15,1	1,08	14,27 (0,13) C	1,68
Triticale	TV1 Zarab Panna	11,1	11,7	1,08	14,13 (0,01) B	-
	TV2 Amica	11,1	11,7	1,08	14,08 (0,01) B	-

Tableau 7 : Caractéristiques analytiques des variétés céréalières soumises à l'essai de sensibilité à *Sitophilus oryzae* L.

Les chiffres entre parenthèses représentent l'écart-type de la moyenne. Dans la même colonne, les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (Test de Newman-Keuls à $P \leq 0,05$)

2-1-2-Paramètres caractéristiques du potentiel biotique exprimé par *S. oryzae* sur différentes espèces et variétés céréalières en conditions contrôlées de développement.

2-1-2-1-Fécondité des femelles (nombre de descendants)

L'analyse de variance du nombre d'insectes émergés (annexe 1, Tabl. A.1.1. et A.1.2) a montré que les deux facteurs, espèce et variété, ont eu un effet très hautement significatif sur l'effectif de charançons ($P < 0,0001^{***}$). C'est ainsi que l'effectif le plus élevé a été enregistré par les deux variétés de triticale (TV₂, puis TV₁) suivies par les blés tendres (BTV₂, puis BTV₁). A l'opposé, les variétés de blé dur se sont différenciées nettement des autres « traitements » par l'absence de descendants, ce qui indique une résistance remarquable à l'attaque des charançons dans les conditions de notre expérimentation où les grains étaient très secs. En effet, les teneurs en eau inférieures ou égales à 11 % ont

été montrées impropres aux attaques de *S. oryzae* sur blé par de nombreux auteurs (Howe, 1965 ; Steffan, 1978). Les variétés des deux autres espèces (blé tendre, triticales) testées ont constitué un substrat favorable à la multiplication du charançon du riz. Ceci peut être mis en relation d'une part avec la moindre dureté des grains et, d'autre part, avec leur composition biochimique, les triticales étant connues pour leur valeur nutritionnelle plus élevée que celle des blés (Laroche, 1981 ; Benbelkacem, 1987 ; Benbelkacem, 1991 ; Belloucif, 1999).

2-1-2-2-Durée de développement (DD)

La durée moyenne du développement juvénile de *S. oryzae* n'a pu être calculée que pour les variétés de blé tendre et de triticales. En effet, aucune émergence n'a été enregistrée dans les deux variétés de blé dur. Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ce comportement :

- La ponte n'a pu avoir lieu à cause de la teneur basse en eau et de la dureté élevée des grains
- La ponte a eu lieu mais, du fait d'une siccité trop importante du grain, il y aurait eu une dessiccation des oeufs ou des jeunes larves avant qu'elles n'atteignent le stade adulte.

Le critère de durée de développement du blé dur n'a donc pas pu être inclus dans les analyses statistiques relatives aux trois espèces. L'analyse statistique au niveau des blés tendres et triticales a montré un effet très hautement significatif des facteurs « espèce » et « variété » sur la durée de développement des insectes (Tabl. 8 ; annexe 1, Tabl. A.1.1.). Cette dernière a varié significativement du blé au triticales et d'une variété à l'autre pour la même espèce céréalière. La DD la plus courte a caractérisé les triticales. Cette espèce de céréale a donc offert un milieu particulièrement favorable au développement juvénile du charançon, ce qui semble confirmer que la valeur nutritionnelle du triticales pour le charançon a été significativement supérieure à celle du blé tendre. Cette observation est cohérente avec l'effectif de la descendance de 1^{ère} génération enregistré sur les variétés de triticales, qui est supérieur à celui observé sur blé tendre.

2-1-2-3-Indice de sensibilité (IS)

Cet indice étant proportionnel au logarithme de l'effectif d'insecte et inversement proportionnel à la durée de développement a permis de classer les espèces ou les variétés en fonction de leur niveau de sensibilité à l'infestation. Ainsi, plus l'indice est élevé, plus la variété est sensible. Pour les variétés de blé dur ayant présenté une « résistance » totale, nous avons considéré l'IS nul pour cette espèce. C'est ainsi que l'analyse de variance a montré que l'effet espèce et variété est très hautement significatif (THS) ($P < 0,0001^{***}$) (annexe 1, Tabl. A.1.2.). Les variétés de triticales, dont l'indice dépasse 15, peuvent être considérées comme significativement plus sensibles à l'infestation et aux dégâts commis par le charançon *S. oryzae* que celles de blé tendre et de blé dur. Le fait que l'IS des deux variétés de blé tendre soit supérieur à 10, nous avons conclu de ce premier essai que ni le blé tendre, ni le triticales ne présentaient de réelle tolérance à l'infestation par le charançon du riz. Le stockage de cette dernière espèce, particulièrement intéressante au niveau rendement agronomique et qualité nutritionnelle, sera difficile à gérer et nécessitera des mesures de protection multiples et intégrées pour une conservation optimale dans le temps.

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

Especes	Variétés	Repiques	EFF Total	Moy. EFF	D.D	Moy. D.D	IS	Moy. IS
BLE DUR	BDYS Maha Jais/Be	1	0				0	
		2	0	0,000			0	0,000
		3	0				0	
	BDYS Pala	1	0				0	
		2	0	0,000			0	0,000
		3	0				0	
BLE TENDRE	BTYS Koa	1	36			37	39,31	
		2	34	31,87 (2,08)	B	34	33,27	39,89
		3	31		33	31,50	A	39,25
	BTYS Jabon d'Amor	1	34			31	32,33	32,33
		2	31	31,87 (2,08)	C	33	31,83	32,3
		3	30		32	31,30	B	32,33
TRITICALE	TV1 Jais/Be / Pala J	1	62			58	53,89	
		2	60	61,87 (2,08)	B	59	59,83	53,78
		3	62		58	57,30	C	53,88
	TV1 Jais/Be	1	58			54	58,71	
		2	54	53,33 (2,08)	A	53	54,24	58,88
		3	55		53	53,30	B	58,3

Tableau 8 : Paramètres biologiques en liaison avec l'infestation par *S. oryzae* de différentes espèces et variétés céréalières

Les chiffres entre parenthèses représentent l'écart-type de la moyenne. Dans la même colonne, les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (Test de Newman-Keuls à $P \leq 0,05$)

2-1-3-Analyse de l'origine physico-chimique des différences de qualité des céréales et de leurs variétés pour l'insecte par l'étude des corrélations simples (variable par variable)

De la matrice de corrélation Pearson (Tabl. 9) relative aux trois espèces de céréales étudiées, nous avons observé des corrélations simples, à la limite de la signification, entre des variables physico-chimiques et les paramètres biologiques de *S. oryzae*. Ces corrélations restent cependant intéressantes à noter car elles expriment des effets logiques et concrets inter-variables.

L'effectif des descendants de 1^{ère} génération (EFF) était d'autant plus important que la teneur en eau des grains était élevée (coefficient de corrélation $C_c = 0,816$) et que la dureté s'abaissait ($C_c = -0,436$). Cette relation étroite entre l'élévation de la teneur en eau du grain et l'amplification du taux d'accroissement des populations de charançons des grains a été soulignée par de nombreux chercheurs parmi lesquels nous pouvons citer Eden (1952), Russel (1962), Singh et Mc Cain (1963), Dobie (1974), Juliano (1981), Sudakhar et Pandey (1982), Horber (1983), Anonyme (1984), Philogene et Arnason (1988), Fourar (1994).

Une corrélation négative assez significative a été relevée entre la teneur en eau et la dureté des grains des trois céréales ($C_c = -0,611$). Cette corrélation devient significative lorsqu'elle est appliquée seulement aux blés ($C_c = -0,965$) (Tabl. 10). Plus la teneur en eau des grains augmente, plus leur dureté s'amointrit et le milieu devient plus favorable à la multiplication des charançons. Celle-ci est freinée ou annulée lorsque les grains s'assèchent suite à la difficulté pour les femelles de forer

les grains les plus durs pour y insérer leurs œufs. L'effet de l'humidification des grains sur la réduction de leur dureté est appliquée en meunerie et semoulerie où les grains, pour une mouture optimale, sont humidifiés intentionnellement jusqu'à un seuil normalisé pour permettre une meilleure friabilité des grains et une séparation aisée des enveloppes et de l'amande.

En nous référant à la matrice de corrélation de Pearson relative soit aux blés durs et blés tendres (Tab. 10) (1) soit aux blés tendres et triticales (Tabl. 11) (2), diverses corrélations significatives ou à la limite de la signification ($P \leq 0,05$) ont été notées. Elles montrent l'importance de la composition nutritionnelle et de la teneur en eau de l'hôte pour la multiplication du charançon :

- (1) Effectif \square Protéines Cc = 0,976
- (1) Effectif \square Cellulose Cc = 0,826
- (2) Effectif \square Cendres Cc = 0,887
- (2) DD \square Cendres Cc = \square 0,892
- (2) DD \square Teneur en eau Cc = \square 0,624
- (2) DD \square Protéines Cc = 0,710

Ainsi, le nombre de descendants du charançon est d'autant plus important que la teneur en protéines, en matières minérales et celluloses augmente. Il ressort que l'élévation du taux de cendres et de la teneur en eau des grains est favorable au charançon, ce qui est traduit par la réduction de la durée de développement. Cependant, des milieux riches en protéines semblent influencer négativement sur la durée de développement des insectes dans le blé tendre et le triticales (Tabl. 11), comportement que nous avons également observé antérieurement (Fourar, 1994). Cette observation peut s'expliquer par les caractéristiques particulières des variétés étudiées. Ainsi, pour les blés tendres et les triticales, les conditions expérimentales semblent tout à fait favorables au charançon, l'augmentation du

nombre de descendants allant de paire avec la réduction de la durée de développement (Effectif \square DD : Cc = \square 0,995).

Variables	Teneur en eau	Protéines	Cendres	DD (jours)	Effectif	n
Teneur en eau	1	-0,462	0,328	-0,611	0,828	0,891
Protéines	-0,462	1	-0,328	0,328	-0,300	-0,158
Cendres	0,328	-0,328	1	0,478	0,088	-0,217
Durée	-0,611	-0,328	0,478	1	-0,488	-0,178
Effectif	0,828	-0,300	0,088	-0,488	1	0,975
n	0,891	-0,158	-0,217	-0,178	-0,175	1

Tableau 9 : Matrice de corrélation (Pearson (n)) Blé tendre-Blé dur-Triticale

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

variables	Teneur eau	Protéines	Densité	Durée	Densité	Effectif
Teneur eau	1	0,388	-0,258	-0,368	-0,277	0,421
Protéines	0,388	1	-0,214	-0,481	0,808	0,874
Densité	-0,258	-0,214	1	0,257	-0,230	-0,524
Durée	-0,368	-0,481	0,257	1	-0,273	-0,587
Densité	0,277	0,808	0,230	-0,273	1	0,824
Effectif	0,421	0,874	-0,524	-0,587	0,824	1
II	0,388	0,842	-0,448	-0,714	0,824	0,841

Tableau 10 : Matrice de corrélation (Pearson (n)) Blé tendre-Blé dur

variables	Teneur eau	Protéines	Densité	Durée	Effectif	CC	II
Teneur eau	1	-0,809	0,278	-0,227	0,252	-0,824	0,588
Protéines	-0,809	1	-0,640	-0,288	-0,874	0,710	-0,827
Densité	0,278	-0,640	1	0,871	0,227	-0,272	0,640
Durée	-0,227	-0,288	0,871	1	0,871	-0,618	0,640
Effectif	0,252	-0,874	0,227	0,871	1	-0,228	0,242
CC	-0,824	0,710	-0,272	-0,618	-0,228	1	-0,488
II	0,588	-0,827	0,640	0,640	0,242	-0,488	1

Tableau 11 : Matrice de corrélation (Pearson (n)) Blé tendre-Triticale

2-1-4-Indices de résistance potentielle des variétés

A partir du tableau 8, nous avons pu établir les critères de dynamique des populations pour les variétés de blé tendre et de triticales. Le blé dur n'a pas été pris en considération du fait que, dans nos conditions expérimentales, il a présenté une résistance « totale » (Tabl. 12).

Il ressort que le blé tendre avec la variété *Kau*, est le plus tolérant à l'attaque du charançon par rapport au triticales avec la variété *Juanillio* qui est le plus sensible. Le calcul de la population théorique de *S. oryzae*, après 12 semaines, montre, à partir de 5 couples de parents, que 32 descendants sont obtenus sur la variété *Kau* contre 84 sur la variété *Juanillio*. A partir de l'hypothèse que 2/3 du grain sont consommés par l'insecte pour effectuer son cycle complet de l'œuf à l'adulte (Anglade, 1970), nous avons pu calculer la perte de masse absolue pour 1000 grains réalisée par l'effectif produit. Cette perte est de 1,93 g dans la variété de blé tendre et de 19,68 g dans celle du triticales : la résistance potentielle de la variété *Kau* peut freiner de 90,2 % les dégâts de *S. oryzae* par rapport à la variété *Juanillio* dont la sensibilité est plus élevée.

Quand on se réfère aux deux variétés de triticale, les indices de sensibilité (IS) semblent assez proches : 15,77 pour *Lad 183/Porsas 2* et 16,66 pour *Juanillio*. La population théorique d'insectes atteinte en 12 semaines et les pertes pondérales sont cependant nettement distinctes (236 descendants et 7,08g de perte dans *Lad 183/Porsas 2* contre 642 descendants et 19,68 de perte dans *Juanillio*). Bien que les deux variétés se soient avérées particulièrement sensibles, la variété *Lad 183/Porsas 2* présente une résistance potentielle qui peut freiner de 64% les dégâts de *S. oryzae* par rapport à la variété *Juanillio*.

Le cas du blé dur est cependant remarquable car n'ayant montré aucune descendance et aucune perte ; dans les conditions de notre essai, le blé dur s'est caractérisé par une réelle résistance ce qui est très intéressant et prometteur pour notre pays qui s'intéresse particulièrement à cette céréale.

	VARIÉTÉS			
	Blé tendre		Triticale	
	<i>Blé</i>	<i>Molène</i>	<i>Lad 183/Porsas 2</i>	<i>Juanillio</i>
Efficacité (10 adultes) ^{**}	11,81 (0,21) d	11,81 (0,21) c	11,81 (0,21) b	11,77 (0,21) a
Taux multiplicatif	0,33	0,33	0,33	0,37
Débit de développement (jours) ^{**}	11,31 (0,21) a	11 (0,21) b	10 (0,21) c	10,99 (0,21) d
Débit de développement (jours)	1,01	0,27	0,34	0,22
Moyenne IS ^{**}	15,77 (0,21) d	16,24 (0,21) c	15,77 (0,21) b	16,66 (0,21) a
Cap. intrinsèque d'accroissement (adultes/jour)	0,1100	0,1110	0,2000	0,3000
Population théorique atteinte en 12 semaines	17	240	236	642
PMG (g)	43	834	403	44
Perte de masse théorique pour 1000 grains (g) ^{**}	1,01	2,0	7,08	19,68
Taux de perte de grains en 12 semaines (1g par 1000 gr.)	4,45	0,21	13,71	43,8

Tableau 1 2 : Modèle exponentiel de l'accroissement des populations d'adultes de *S. oryzae* dans les variétés de blé tendre et de triticale : comparaison des paramètres du taux intrinsèque d'accroissement naturel et des pertes pondérales occasionnées.

* Les chiffres entre parenthèses représentent l'écart-type de la moyenne

* * Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil d'erreur $P \leq 0,05$

*** 2 / 3 du grain est consommé quand l'insecte a effectué son cycle complet de l'œuf à l'adulte (forme cachée)

Les paramètres du taux intrinsèque d'accroissement naturel des insectes ont été évalués à partir de la procédure de calcul utilisée par Fleurat-lessard et Poisson (1984) et Sanchez-martinez *et al.* (1997) :

- Taux de multiplication par femelle = Effectif / Nbre de Femelles
- Capacité nette de multiplication = Effectif / Nbre de parents = a
- Taux d'accroissement en semaine = $a^* 7 / DD = b$
- Capacité intrinsèque d'accroissement / semaine : $Rm_S = \text{Log } b$
- Taux fini d'accroissement / semaine = e^{Rm_S}

2-2-Etude 2: Evolution au cours du temps des qualités alimentaires et technologiques des blés sous l'effet du ravageur *Sitophilus oryzae* L.

2-2-1-Essai à échelle réduite

2-2-1-1-Cas du blé tendre

2-2-1-1-1-Caractéristiques qualitatives des variétés de blés soumises à l'expérimentation.

D'après le tableau 13, l'ensemble des variétés soumises à l'expérimentation ont présenté un état sanitaire acceptable (teneur en eau et activité amylolytique basses, faculté germinative appréciable). La qualité nutritionnelle était intéressante et la valeur boulangère variée, la gamme de forces boulangères des variétés étant étendue ; la variété Mahon démias a présenté une force boulangère extrêmement faible. C'est, en réalité, une variété fourragère qui, actuellement, est néanmoins classée dans la liste provisoire des céréales autorisées à la production et à la commercialisation en vue de l'industrie (J.O. n°7, annexe 1, 28/01/2009). Selon les conditions de culture et l'année de production, cette variété peut présenter une teneur en protéines particulièrement élevée accompagnée d'une force boulangère extrêmement faible, inutilisable en panification ou biscuiterie. C'est le cas de la farine issue de *Mahon demias*, récolte 1991, qui a présenté un taux de protéines de 17,3% (sur base MS) et des caractéristiques alvéographiques très faibles ($W = 45$, $G = 13,3$) (Fourar, 1994).

La variabilité variétale semble assez forte pour entraîner une différence dans la réponse de la descendance du charançon.

2-2-1-1-2-Paramètres relatifs au développement des insectes et qualité microbiologique.

A partir des analyses de variance (annexe 2, Tabl. A.1. 3), des effets divers ont été constatés :

- Un effet très hautement significatif des facteurs « Infestation » et «Durée de stockage » sur l'effectif de charançons et les pertes globales en poids ($P < 0,0001^{***}$) a été enregistré. Le facteur variétal a également influé significativement sur ces

deux paramètres ($P = 0,026^*$ et $P = 0,004^{**}$ pour l'effectif et les pertes en poids respectivement).

En particulier, la variété Mahon démias a présenté le plus grand nombre de descendants par opposition aux variétés V_1 et V_5 mais également le % de pertes le plus élevé comparativement aux autres variétés (Tabl. 14). Ainsi, bien que les conditions d'humidification des grains aient été défavorables à la multiplication du charançon, la variété Mahon démias, particulièrement sensible, a enregistré, après trois mois de stockage, une perte globale en poids très importante (2,7 %) rendant le lot impropre à la consommation humaine (Anonyme, 1984). Par contre, la lignée Minch /3*BCN, en voie de sélection, et HD1220, variété témoin, se sont montrées moins sensibles à l'attaque du charançon avec un effectif réduit de moitié par comparaison à la variété Mahon démias et des pertes pondérales plus faibles : 0,44 et 0,85 % (pour V_1 et V_5 respectivement). La réduction de ces pertes pondérales, par rapport à Mahon démiasa donc été de 84 % pour Minch /3*BCN contre 69 % pour HD1220 ce qui est très important au niveau économique.

Variété	Taux (%)	Caractéristiques analytiques						Indice de chute (%)
		Famille (Gens) (%)	Protéines (%)	Cendres (%)	Cellulose (%)	Abruyage V (mg/g)	G (mg)	
V_1 Minch /3*BCN	11,18	87 (2,37) B	11,05	1,27	2,01	179	14,73	40
V_2 Minch /3*BCN	11,18	87 (2,37) B	12,11	1,01	2,48	211	11,2	44
V_3 Minch	11,18	83 (2,40) B	12,15	1,11	2,01	41	11,1	49
V_4 Mahon démias	11,18	81 (2,30) A	14,35	1,41	2,42	11	11	42
V_5 HD 1220	11,18	88 (2,37) B	11,18	1,38	2,27	211	11	100

Tableau 13 : Caractéristiques analytiques des variétés de blé tendre en début d'expérimentation

* Les chiffres entre parenthèses représentent l'écart-type de la moyenne

** Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes au seuil d'erreur $P \leq 0,05$

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

Variété	Infest.	Densité (g)	Teneur eau (%)	Epaisseur	Pertes FG (%)	Contam. (No. S/D)	Ind. High (U)
V1 BOW/MOR/BAU	V1 Démias	40	11,21	0	0	1,21	413
	V1 infesté	40	10,80	12,33	0,02	1,27	405
	V1 Démias	60	12,12	0	0	1,28	408
	V1 infesté	60	12,08	79	0,22	1,24	400
	V1 Démias	80	12,23	0	0	1,20	408
	V1 infesté	80	12,20	141,25	0,44	1,2	471
V2 BOW/MOR/BAU	V2 Démias	40	11,28	0	0	1,21	407
	V2 infesté	40	10,85	12	0,02	1,2	405
	V2 Démias	60	12,03	0	0	1,28	400
	V2 infesté	60	12,42	18,22	0,12	1,4	408
	V2 Démias	80	12,31	0	0	1,28	402
	V2 infesté	80	12,28	221	0,7	1,28	472
V3 MAHON	V3 Démias	40	11,28	0	0	1,21	401
	V3 infesté	40	11,08	40,22	0,02	1,20	403
	V3 Démias	60	12,41	0	0	1,21	405
	V3 infesté	60	12,21	117	0,28	1,21	471
	V3 Démias	80	12,23	0	0	1,21	402
	V3 infesté	80	12,08	212	0,28	1,21	474
V4 MAHON/BAU	V4 Démias	40	11,28	0	0	1,27	401
	V4 infesté	40	10,88	40,22	0,12	1,21	401
	V4 Démias	60	12,28	0	0	1,21	404
	V4 infesté	60	12,28	118	0,02	1,41	400
	V4 Démias	80	12,42	0	0	1,28	400
	V4 infesté	80	12,28	140,22	0,72	1,21	470
V5 MAHON	V5 Démias	40	11,28	0	0	1,2	412
	V5 infesté	40	11,21	28	0,02	1,28	398
	V5 Démias	60	12,21	0	0	1,21	398
	V5 infesté	60	12,28	79	0,28	1,21	397,7
	V5 Démias	80	12,21	0	0	1,21	399
	V5 infesté	80	12,21	111	0,22	1,21	342

Tableau 14 : Evolution des caractéristiques analytiques des variétés de blé tendre en cours d'expérimentation (3 niveaux de prélèvement).

Le contrôle microbiologique, effectué pour l'ensemble des traitements après trois mois de stockage, a montré que les facteurs « Variétés » et « Infestation » ont influé d'une façon très hautement significative ($P < 0,0001^{***}$) sur le % de contamination fongique des grains. Celui-ci était le plus élevé pour la variété Mahon démias (V₄) ayant connu l'infestation la plus importante mais également pour BOW/MOR/BAU (V₂) (Tabl. 15). Pour ces deux variétés, la contamination du témoin était supérieure à celle des autres variétés d'où un enrichissement microbien supérieur dans les traitements infestés. La contamination élevée de V₂ peut également être liée à la structure et l'épaisseur du péricarpe, qui peuvent être différentes d'une variété à l'autre et influencer la sensibilité de la variété à la contamination par les germes fongiques transportés par les insectes. D'une façon générale, le taux de contamination fongique des traitements infestés était significativement plus important que celui des témoins. Les insectes sont-ils à l'origine de cette contamination en

tant que vecteurs de microorganismes ? Les dégâts qu'ils occasionnent sur grain favorisent-ils la contamination microbiologique ?

Niveau d'infestation Répétition	V1 MAHON DEMIAS		V2 SOUJOURBAT		V3 AZZA		V4 MAHON DEMIAS		V5 HD 1220	
	Sain	Infecté	Sain	Infecté	Sain	Infecté	Sain	Infecté	Sain	Infecté
1	50	70	60	70	50	80	60	80	60	70
2	60	70	70	80	40	70	80	70	70	80
3	40	70	70	70	70	70	80	70	50	70
4	70	60	80	80	80	80	70	70	80	70
5	60	70	80	80	50	80	80	80	50	80
6	50	60	70	80	80	70	80	80	50	80
7	40	70	70	80	40	70	60	80	60	70
8	40	60	60	80	40	80	50	70	50	60
9	60	70	80	70	40	70	80	80	50	70
10	50	60	80	80	50	80	80	70	80	70
Moy	61	69	74	80	60	75	80	77	66	78

Tableau 15 : Résultats comparatifs Blé tendre "% Contamination fongique" au 3ème prélèvement, méthode d'Ulster.

L'identification des champignons a montré qu'ils appartenait à des genres de la mycoflore du champ, de la flore intermédiaire et de la flore de stockage : *Fusarium* sp.,

Alternaria sp., *Stemphylium* sp., *Cladosporium* sp., *Helminthosporium* et *Penicillium* sp.

Les variétés de blé tendre ont donc présenté une tolérance à l'attaque du charançon distincte : Mahon demias dont la qualité nutritionnelle est la plus élevée a présenté le nombre de descendants le plus important comparativement aux quatre autres variétés. Dans ce groupe, HD 1220, variété de type « hard » à grains vitreux, cultivée à grande échelle en Algérie, a présenté l'effectif le plus faible et donc la tolérance la plus forte à l'attaque de ce déprédateur. Son inscription dans le catalogue des céréales cultivées en Algérie semble tout à fait justifiée : HD 1220 allie donc une qualité agronomique et technologique élevées renforcées, comme le montrent nos résultats, par une tolérance à l'attaque du charançon appréciable. Par contre, Mahon demias, variété qui allie une qualité industrielle nulle à une sensibilité aux insectes des stocks très élevée, devrait être éliminée de la liste provisoire des variétés de blé tendre autorisées à la production et à la commercialisation en Algérie (J.O. n°7, 28/01/2009).

2-2-1-1-3-Evolution des paramètres nutritionnels et sanitaires.

Le prélèvement alimentaire est le premier résultat de toute infestation : les déprédateurs doivent assurer leurs besoins nutritionnels surtout dans la phase de croissance larvaire mais, également, chez la femelle, pour la production des œufs et de l'énergie dépensée à creuser les trous de ponte. Selon le milieu alimentaire qui leur est offert et la présence de microorganismes symbiotiques, ces besoins, quantitatifs et qualitatifs en protéines, glucides, matières grasses, vitamines et matières minérales, sont plus ou moins assurés par

les prélèvements. Parallèlement, l'état sanitaire de la denrée infestée s'altère en fonction des conditions du milieu et du niveau d'infestation. Dans notre expérimentation, nous avons pu montrer que :

- La teneur en eau des différents traitements, dans le temps, était basse : nous n'avons pas pu atteindre l'humidité relative de 70% dans l'étuve. Celle-ci était en réalité de l'ordre de 65% suite à un conditionnement insuffisant. Cette HR basse n'a pas favorisé le développement du charançon dans les grains des cinq variétés conservées en conditions comparables. Au premier prélèvement, la teneur en eau des grains était uniforme, de l'ordre de 11% (Tabl. 14) ; nous avons donc essayé de corriger l'humidité relative par utilisation d'une solution de glycérol que nous avons remplacée par une solution saturée de NaCl (Winston et Bates, 1961) ; le rôle de ces solutions saturées salines est d'atteindre une humidité relative donnée permettant aux grains, matériau hygroscopique, de s'humidifier ou de s'assécher suivant l'objectif visé. Dans les conditions de notre essai, cette technique a montré une efficacité insuffisante car elle exige une étanchéité élevée : l'étuve, contenant l'ensemble des traitements blé tendre et blé dur, n'était pas assez étanche pour une bonne efficacité des solutions salines, particulièrement au cours des trois prélèvements où son ouverture fréquente perturbait l'HR de l'air ambiant qu'elle contenait.

Au deuxième et troisième prélèvement, nous avons constaté une légère élévation de l'HR (68%) entraînant une élévation significative ($P < 0,0001^{***}$) de la teneur en eau de 1% en moyenne pour l'ensemble des traitements (Tabl. 14 ; annexe 1, Tabl. A.1.3). Au troisième prélèvement, la teneur en eau était de l'ordre de 12,3 % représentant encore des conditions peu favorables pour le développement de l'insecte ravageur dont la durée de développement est alors plus longue, sans empêcher la ponte.

- Le taux de cendres des grains, différent d'une variété à l'autre, a enregistré une réduction nette dans le temps suite au prélèvement d'endosperme par les insectes : les facteurs « Variétés », « Infestation » et « Durée de stockage » ont influé d'une façon très hautement significative ($P < 0,0001^{***}$) sur ce paramètre (Tabl. 14 ; annexe 1, Tabl. A13). Minch/3*Bcn était la plus riche en matières minérales suivies de Mahon demias et Bow/Mor/Bau puis de Anza et enfin de HD 1220. Effectivement, la richesse en matières minérales est fonction de la variété en premier lieu puis des conditions de culture (Feillet, 2000).
- Au troisième prélèvement, l'analyse de variance a indiqué un effet très hautement significatif ($P < 0,0001^{***}$) du facteur « Infestation » et significatif ($P = 0,020^*$) du facteur « Variétés » sur la teneur en acide urique (Tabl. 16). Cette substance du métabolisme azoté des insectes, toxique, accompagne donc nécessairement l'infestation, la teneur étant fonction de la variété, plus précisément de sa sensibilité à l'infestation par les insectes. Mahon demias étant la variété où l'effectif est le plus important, a vu sa teneur en acide urique s'élever nettement ainsi que Anza contrairement aux autres variétés. Il est à souligner que tous les échantillons variétaux témoins comprenaient de l'acide urique. Ceci doit être en relation avec une infestation antérieure à l'essai. Il faut rappeler que tous nos échantillons ont été traités, à la réception, par un insecticide à tension de vapeur élevée, non rémanent (tétrachlorure de carbone).

La détermination de la teneur en acide urique d'un échantillon de grains ou dérivés pourrait constituer un indicateur de l'état hygiénique des céréales infestées. Il serait possible de dépister, au niveau du commerce, des farines issues de lots de blé ayant subi une infestation

antérieure puis un tamisage pour l'élimination des insectes. Ce cas de fraude volontaire ou involontaire devrait être recherché dans les blés importés mais également locaux.

Facteurs étudiés		AU (mg/100g farine) (AU)	Co-les	Prob	CV (%)
Variétés	V ₁ Léon 2180	8,34	B	< 0,001	22,1
	V ₂ Léon 2180	13,27	B		
	V ₃ Arde	16,27	B		
	V ₄ Léon 2180	24,24	A		
	V ₅ Léon 2180	12,28	B		
Etat infestation	Témoin (T)	7,87	B	< 0,001***	
	Infesté (I)	22,14	A		

Tableau 16 : Concentration d'acide urique (AU) des variétés de blé tendre expérimentées après 90 j de stockage

Dans la même colonne, les valeurs portant des lettres différentes sont significativement différentes (Test de Newman-Keuls à $P \leq 0,05$)

2-2-1-1-4-Evolution des paramètres technologiques.

Les blés tendres étant destinés essentiellement à la transformation industrielle, nous nous sommes intéressés à la qualité technologique des variétés soumises à l'expérimentation par la mesure de l'activité amylolytique (Tabl. 14), du taux d'extraction (Tabl. 17) et des caractéristiques plastiques des grains et farines issues, témoins et infestés (Tabl. 18). Il s'avère que l'activité des amylases n'a pas évolué dans le temps et n'a pas été influencée par l'infestation qui a cependant influé négativement sur le taux d'extraction : les pertes sont d'autant plus importantes que l'infestation est forte. Par ailleurs, celle-ci a fortement réduit la force boulangère des blés et le déséquilibre des caractéristiques plastiques des farines issues, ce qui constitue un inconvénient majeur pour les blés tendres destinés aux industries céréalières. Cet effet négatif a été mis en évidence dans nos recherches antérieures et par d'autres chercheurs (Venkat Rao, 1960 ; Sharma *et al.*, 1979, Fourar, 1987 ; Fourar, 1994).

Variétés	Etat d'infestation	Taux d'extraction (%)	Relative T d'extrait (%)
Léon 2180	Témoin	88,4	14
	Infesté	82,4	
Arde	Témoin	89,0	15,1
	Infesté	84,8	
Léon 2180	Témoin	89,4	15,1
	Infesté	82,4	
Léon 2180	Témoin	88,8	15,1
	Infesté	82,8	
Léon 2180	Témoin	89,0	14
	Infesté	82,8	

Tableau 17 : Taux d'extraction des variétés de blé tendre expérimenté après 90 j de stockage.

Variété	Etat d'infecté/Non	Caractéristiques alvéographiques			
		W	Q	P	PL
V ₁ Admiral/MSB	Tendre	170	14,79	89,3	2,1
	Induré	100	13,1	78,2	2,2
V ₂ Eco/MSB	Tendre	200	18,3	84,1	1,4
	Induré	200	16,8	85,9	1,5
V ₃ Aria	Tendre	85	10,3	40,7	0,7
	Induré	140	17,1	70,7	1,3
V ₄ Admiral/MSB	Tendre	95	10	44	2,2
	Induré	75	11,79	70,4	2,4
V ₅ Eco/MSB	Tendre	200	18	104,7	1,8
	Induré	200	17,1	87,9	1,4

Tableau 18 : Caractéristiques alvéographiques des variétés de blé tendre expérimenté après 90 j de stockage.

2-2-1-2-Cas du blé dur

2.2.1.2.1. □ Caractéristiques qualitatives des variétés soumises à l'expérimentation.

Du tableau 19, il ressort qu'en début d'expérimentation l'état sanitaire des variétés s'est avéré convenable (teneur en eau et activité amylolytique faibles, faculté germinative acceptable). Au niveau nutritionnel, elles ont constitué un milieu favorable au développement du charançon (teneur en protéines et en cendres élevée), alors que du point de vue technologique, elles semblaient assez proches et de qualité pastière supérieure, à savoir jugement mixographique et hauteur de pic élevés, indices de coloration (IJ, IB) faibles à combinaison permettant l'obtention d'une couleur jaune ambrée acceptable, état recherché par l'industrie agroalimentaire et le consommateur.

Variété	Taux (%)	PAB (g/kg)	Protéine (%)	Cendres (%)	Fibres (%)	Fibres (%)	Mixographie		Indices de coloration		Indice de dureté
							Hauteur (mm)	Largeur (mm)	IJ	IB	
V ₁ Admiral/MSB	11,8	11	17,8	14,1	2,8	1,1	7,1	8	1,1	1,2	4,9
V ₂ Eco/MSB	11,8	41,1	15,5	12,2	2,1	1,4	7,1	8	1,4	1,4	4,9
V ₃ Aria	11,8	41,9	17,8	12,4	1,4	1,1	6,8	7	1,2	1,8	4,9
V ₄ Admiral/MSB	11,8	40,7	17,1	11,1	2,1	1,1	6,1	8	1,4	1,1	4,9
V ₅ Eco/MSB	11,8	47,2	15,8	11,8	2,1	1,1	6,7	7	1,4	1,1	4,9

Tableau 19 : Caractéristiques analytiques des variétés de blé dur en début d'expérimentation.

2-2-1-2-2-Paramètres relatifs au développement des insectes et qualité microbiologique.

Notre essai a montré que le blé dur, dans nos conditions expérimentales, a présenté une tolérance appréciable à l'attaque du charançon (Tabl. 20) : le nombre de descendants et les pertes globales en poids les plus importantes ont été enregistrés chez la variété MBB/LAHN'S (V₂) (101 et 2,5%) contre 4 à 18 et 0,64 à 0,73% dans les quatre autres variétés. L'aptitude au stockage de ces dernières variétés semble élevée dans les conditions de notre expérimentation (notamment la teneur en eau des grains < 12,5%).

- Comme pour les blés tendres, l'humidité relative dans l'étuve était basse, 65%, et nous avons tenté de la corriger jusqu'à atteindre 68% à l'aide d'une solution saturée de NaCl. Au départ de l'expérimentation, la teneur en eau des grains des différents traitements, était donc basse. Cependant, du 1^{er} au 3^{ème} prélèvement, nous avons constaté une élévation significative de la teneur en eau ($P < 0,0001^{***}$) (annexe 1, Tabl. A.1.4) de 1% en moyenne pour les traitements témoins et de 1,5 à 2% pour les échantillons infestés. Nous avons également noté que la teneur en eau des traitements infestés a été significativement plus réduite que celle des témoins, particulièrement pour les variétés Ada/PRF/Ofanto et Vitron ($P < 0,0001^{***}$). Ce résultat est en contradiction avec ceux obtenus par Agrawal *et al*, 1957, cités par Sinha (1987) et Imura et Sinha (1984), qui ont montré qu'une infestation du blé par les charançons entraîne une humidification plus poussée des grains. Ceci doit être en relation avec l'effectif faible d'insectes obtenu dans les conditions de notre expérimentation.
- Les facteurs « Variétés », « Infestation » et « Durée de stockage » ont influé d'une façon très hautement significative ($P < 0,0001^{***}$) (annexe 1, Tabl. A.1.4) sur le taux de cendres, résultat que nous avons enregistré pour l'essai précédent du blé tendre.
- L'analyse de variance a montré un effet très hautement significatif des trois facteurs étudiés sur la teneur en protéines ($P < 0,0001^{***}$) (annexe 1, Tabl. A.1.4). Bien que l'ensemble des variétés aient été produites dans les mêmes conditions de culture, le facteur génétique a influé fortement sur leur teneur. Par ailleurs, l'infestation a entraîné, dans le temps, une élévation significative de la teneur en protéines, ce qui a été mis en évidence par certains chercheurs (FAO, 1984 ; Fourar, 1994). Cet enrichissement, relatif, est surtout dû aux habitudes alimentaires de *S. oryzae*, consommateur d'endosperme, mais il est également en relation avec le métabolisme azoté des larves qui est générateur d'acide urique catabolique.

2.2.1.2.3. □ Evolution des paramètres nutritionnels et sanitaires.

L'analyse qualitative de la flore fongique au troisième prélèvement (Tabl. 21) a montré que le genre dominant était *Alternaria* sp., présent dans tous les échantillons, suivi par *Aspergillus* sp., *Rhizopus* sp., *Fusarium* sp. et enfin *Penicillium* sp. Ces champignons appartiennent à des genres de la mycoflore du champ, naturellement présents sur les grains à la récolte (*Alternaria*, *Fusarium*, *Rhizopus*) et des genres de la flore de stockage (*Aspergillus*, *Penicillium*), essentiellement constituée par des espèces fongiques adaptées à des taux d'hydratation des grains de 15-16%. Il ressort du dernier tableau que, selon les genres fongiques, les « traitements » témoins par rapport aux traitements infestés étaient aussi contaminés et parfois davantage. Nous ne pouvons donc affirmer que l'infestation par *S. oryzae* a entraîné une contamination plus poussée des traitements concernés. Une cause probable peut se trouver au niveau de la méthode analytique appliquée qui prévoit

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

une désinfection préalable des grains, pendant 10 mn, à l'hypochlorite de soude (eau de javel). Il s'avère, cependant, que ce désinfectant pénètre davantage dans les grains infestés, donc piqués et rongés, par rapport aux grains sains dont les enveloppes sont intactes. Il est difficile de savoir jusqu'où agit le désinfectant puisque la pénétration dépend de l'état des

assises superficielles qui peut être modifié d'un essai à un autre, ce qui rend la comparaison des résultats souvent hasardeuse (Cahagnier et Fleurat-Lessard, 1996). Pour limiter l'effet du désinfectant, nous avons prévu, pour les essais ultérieurs, de réduire le temps d'action de l'hypochlorite de 10 à 5 min et de ne pas mettre en culture les grains visiblement infestés.

Variété	Blé	Date	Température (°C)	Humidité (%)	Protein. (%)	Glucos. (%)	Glucos. (mg/kg)	Ind. M (g/kg)
V ₁ (2004-05) (2007)	V1 Témoin	-42	12,49	0	0	14,27	1,21	484,7
	V1 infesté	-42	12,47	1,55	4,28	13,7	1,3	451
	V1 Témoin	-82	12,11	0	0	14,28	1,21	418
	V1 infesté	-82	12,49	1,87	4,4	14,27	1,28	441
	V1 Témoin	-82	12,42	0	0	14,28	1,21	442
	V1 infesté	-82	12,18	1,1	4,7	13,87	1,21	487
V ₂ (2004-05) (2011)	V2 Témoin	-42	12,18	0	0	12,21	1,21	471
	V2 infesté	-42	12,27	1,83	4,28	14,27	1,18	488
	V2 Témoin	-82	12,12	0	0	14,22	1,21	417
	V2 infesté	-82	12,22	2,47	1,22	12	1,18	484,3
	V2 Témoin	-82	12,18	0	0	14,49	1,2	497,7
	V2 infesté	-82	12,18	1,1	4,4	12,28	1,22	451,2
V ₃ (2004-05) (2014)	V3 Témoin	-42	12,27	0	0	12,4	1,12	487,7
	V3 infesté	-42	12,23	1,87	4,22	12,71	1,28	497
	V3 Témoin	-82	12,12	0	0	12,48	1,21	451,7
	V3 infesté	-82	12,29	4,47	4,42	14,22	1,24	483
	V3 Témoin	-82	12,18	0	0	12,24	1,2	484,7
	V3 infesté	-82	12,44	2,47	4,71	12,7	1,24	481,2
V ₄ (2004-05) (2015)	V4 Témoin	-42	12,27	0	0	14,14	1,24	457
	V4 infesté	-42	12,47	1	4,28	12,7	1,18	418
	V4 Témoin	-82	12,18	0	0	14,47	1,18	481,7
	V4 infesté	-82	12,47	1,22	4,18	12,3	1,28	451,7
	V4 Témoin	-82	12,42	0	0	14,27	1,21	484,7
	V4 infesté	-82	12,18	1,87	4,24	14,22	1,22	481,7
V ₅ (2004-05) (2016)	V5 Témoin	-42	12,23	0	0	12,71	1,28	421,7
	V5 infesté	-42	12,48	4,22	4,22	14,2	1,24	481,7
	V5 Témoin	-82	12,12	0	0	12,8	1,22	421,7
	V5 infesté	-82	12,42	4,24	4,42	14,21	1,27	421,7
	V5 Témoin	-82	12,49	0	0	14,22	1,2	448
	V5 infesté	-82	12,18	1,87	4,71	14,24	1,22	441,7

Tableau 20 : Evolution des caractéristiques analytiques des variétés de blé dur en cours d'expérimentation (3 niveaux de prélèvement).

Expérience Variétés	Etat d'infestation	Agropyris sp.	Alternaria sp.	Fusarium sp.	Mycoplasma sp.	Penicillium sp.
V ₁ Ado/Gal/Santo	Témoin	---	---	+	+	+
	Infesté	---	---	+	---	+
V ₂ Ado/Santo	Témoin	---	---	+	---	---
	Infesté	---	---	+	---	+
V ₃ Ado/Al	Témoin	---	---	+	+	---
	Infesté	+	---	+	---	+
V ₄ Ado/PFF/Santo	Témoin	---	---	+	---	+
	Infesté	---	---	+	+	+
V ₅ Flou	Témoin	---	---	+	+	+
	Infesté	+	---	---	---	+

Tableau 21 : Mycoflore présente dans les variétés de blé dur expérimentées après 90 j de stockage. Méthode d'Ulster

Variétés	Etat d'infestation	Essai 1	Essai 2	Moy ± SE	Gr-Nb	Prob	CV
V ₁ Ado/Gal/Santo	Témoin	39,84	41,12	39,98 ± 0,17	C	0,0002 HS	8,7%
	Infesté	39,62	40,62	39,12 ± 0,51	A		
V ₂ Ado/Santo	Témoin	21,57	19,00	20,79 ± 0,53	D		
	Infesté	22,00	28,48	24,73 ± 0,43	D		
V ₃ Ado/Al	Témoin	19,08	19,34	19,21 ± 0,13	E		
	Infesté	21,40	19,20	19,8 ± 0,20	D		
V ₄ Ado/PFF/Santo	Témoin	39,39	39,28	39,33 ± 0,10	B		
	Infesté	40,88	40,18	40,53 ± 0,47	A		
V ₅ Flou	Témoin	7,32	7,59	7,45 ± 0,13	E		
	Infesté	10,17	11,28	10,72 ± 0,55	EF		

Tableau 22 : Concentration d'acide urique des variétés de blé dur expérimentées après 90 j de stockage

La teneur en acide urique est, d'une façon générale, plus élevée dans les traitements infestés par rapport aux témoins (Tabl. 22), ce qui confirme le point précédent. Les traitements témoins ont dû, comme les blés tendres, subir un début d'infestation maîtrisée par le traitement insecticide non rémanent appliqué dès la réception des échantillons.

2.2.1.2.4. □ Evolution des paramètres technologiques.

La qualité technologique des blés durs comprend la valeur semoulière (rendement en semoule) et la valeur pastière. Cette dernière regroupe deux aspects très importants pour l'industrie à savoir les caractéristiques plastiques et la couleur des grains, semoules et dérivés. A ces trois aspects primordiaux peut être ajoutée l'activité amylolytique qui, élevée, peut occasionner des gerçures dans les pâtes alimentaires. Nous nous sommes donc intéressés à ces différents critères et nous avons ainsi pu constater que l'infestation a entraîné une réduction du taux d'extraction et donc de la valeur semoulière (Tabl. 23) accompagnée de l'affaiblissement de la valeur pastière et de l'indice de couleur jaune alors

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

que l'indice de brun s'est élevé (Tabl. 24, 25, 26) ; l'altération de ces indices, préjudiciable à la couleur jaune ambrée tant appréciée par le consommateur, renforce la réduction de la qualité industrielle et commerciale des blés durs infestés. Pour tous les traitements, l'activité amylolytique par le biais de l'indice de chute s'est affaiblie très significativement sous l'emprise des facteurs « infestation » et « temps » ($P < 0,0001^{***}$), atteignant 695,7s pour V₃ ce qui est énorme mais imprécis (Tabl. 20). Lorsque l'indice de chute dépasse 400 s, et d'autant plus qu'il est élevé, la mesure devient peu précise. Dans ce cas, il est souhaitable d'augmenter la précision du résultat en utilisant un appareil plus performant : l'amylographe (Mazerand, Directrice des laboratoires de l'ENSMIC, Paris, 1992, *comm. pers.*), dont nous ne disposons pas.

Variété	Etat d'infestation	Taux d'extraction (%)	Réduction T. d'extract (%)
V1 Aga-Gol-Camille	Témoin	50,0	
	Infesté	47,2	5,4
V2 L'Esp-Laura	Témoin	51,8	
	Infesté	48,5	5,7
V3 L'Esp	Témoin	50,2	
	Infesté	45,4	5,7
V4 Aga-RCF-Camille	Témoin	50,0	
	Infesté	44,0	5,2
V5 L'Esp	Témoin	51,2	
	Infesté	45,8	5,1

Tableau 23 : Taux d'extraction des variétés de blé dur expérimenté après 90 j de stockage

Variété	Etat d'infestation	Indice de chute (s)	Grains	Indice	Cl
Aga-Gol-Camille	Témoin	1798 ± 100	5	L'Esp THG	L'Esp
	Infesté	2482 ± 100	10		
L'Esp-Laura	Témoin	1842 ± 100	4		
	Infesté	1772 ± 100	10		
L'Esp	Témoin	1818 ± 100	10		
	Infesté	1820 ± 100	12		
Aga-RCF-Camille	Témoin	1748 ± 100	10		
	Infesté	1748 ± 100	10		
L'Esp	Témoin	1818 ± 100	10		
	Infesté	2082 ± 100	11		

Tableau 24 : Indice de jaune (IJ) des blés durs expérimentés après 90 j de stockage

Variété	Etat d'infestation	Moy. IB ± ET	Classe	IB	Classe
V ₁	Non infesté	10,88 ± 0,00	B	1000	100
	Infesté	10,84 ± 0,00	A		
V ₂	Non infesté	10,89 ± 0,00	B		
	Infesté	10,75 ± 0,00	C		
V ₃	Non infesté	10,40 ± 0,00	B		
	Infesté	10,32 ± 0,00	C		
V ₄	Non infesté	10,41 ± 0,00	B		
	Infesté	10,08 ± 0,00	C		
V ₅	Non infesté	9,78 ± 0,00	B		
	Infesté	10,08 ± 0,00	B		

Tableau 25 : Indice de brun (IB) des blés durs expérimentés après 90 j de stockage

Variété	Etat d'infestation	Préférences I (PI I)			
		CSL (%)	TD (sec)	AP (%)	Aggravé
V ₁	Non	79,4	1,7	1,9	1
V ₁	Infesté	27,9	0,2	9,7	6
V ₂	Non	74,1	1,8	1,9	1
V ₂	Infesté	49,9	0,1	2,9	6
V ₃	Non	89,4	2,4	0,8	1
V ₃	Infesté	49,9	1,8	4,3	6
V ₄	Non	81,1	2,4	1,7	1
V ₄	Infesté	48,7	1,7	3,9	6
V ₅	Non	81,1	1,8	0,8	1
V ₅	Infesté	49,1	1,5	1,7	6

CSL : Coefficient de stabilité
 TD : Temps de développement
 AP : Adhérence de la pâte

Tableau 26 : Caractéristiques mixographiques des variétés de blé dur expérimentées après 90j de stockage

2-2-1-3-Comparaison des résultats obtenus entre blés durs et blés tendres

Les traitements variétaux des deux espèces (5 variétés par espèce) ayant été entreposés dans une même étuve, nous avons donc pu procéder à la comparaison et montrer que :

- Le blé tendre est significativement plus sensible au charançon que le blé dur, le nombre de descendants dans le blé tendre étant plus élevé ($P < 0,0001^{***}$; blé tendre : 48, blé dur : 13) (annexe 1, Tabl. A.1.5). Cependant, le facteur espèce n'influe pas sur les pertes globales en poids (PPG) qui dépendent significativement du facteur variétal. Le test de Newman-Keuls montre, pour cette variable, un classement variétal anarchique, la variété la plus touchée étant un blé dur (V₂). A 12 % de teneur en eau,

les grains de blé dur semblent plus tolérants à l'attaque du charançon mais certaines variétés peuvent présenter une sensibilité similaire sinon supérieure à celle du blé tendre. Les pertes en poids peuvent être égales à plus élevées.

- Au niveau microbiologique, les mêmes conclusions ont concerné les deux espèces : diminution dans le temps du % de contamination fongique mais impossibilité de confirmer le caractère de transmissibilité des microorganismes par la souche de charançon utilisée.
- Au niveau nutritionnel et sanitaire, la réponse des deux espèces de blé a été similaire ; le prélèvement d'endosperme par les insectes entraîne une réduction de la valeur nutritionnelle des grains dont la qualité sanitaire et technologique décroît. Ceci s'illustre par la production d'acide urique, des pertes en poids et une réduction de la qualité boulangère ou pastière avec un déséquilibre prononcé des caractéristiques plastiques en faveur de la ténacité.

2-2-2- Essai à échelle moyenne

2-2-2-1 Cas du blé tendre

2-2-2-1-1- Caractéristiques qualitatives des variétés étudiées.

Comme le montre le tableau 27, les variétés soumises à l'expérimentation ont présenté un état sanitaire satisfaisant (faculté germinative très élevée et activité amylolytique faible) et une teneur en eau favorable à la multiplication du charançon (13%) ; le développement de cet insecte nuisible aux stocks aura donc lieu dans d'assez bonnes conditions d'autant plus que la valeur nutritionnelle des trois variétés, et en particulier leur teneur en protéines, était élevée.

La qualité technologique de l'ensemble des variétés était appréciable et les caractéristiques plastiques distinctes avec deux variétés fortes mais déséquilibrées aux dépens du gonflement et une variété forte et équilibrée, *HD 1220*. Ceci pourrait présenter un intérêt dans notre étude pour souligner l'effet des insectes sur la qualité industrielle des blés tendres.

La masse à l'hectolitre mesurée par la masse de grains contenue dans un volume de 250 ml était élevée pour deux variétés (V_1 et V_3) et faible pour V_2 en rapport avec le poids de 1000 grains (PMG) et leur calibre. Ce paramètre est influencé par de nombreux facteurs, dont la teneur en eau, la forme, le calibre, la densité des grains, la propreté du lot, ... Nos échantillons étant propres et de teneur en eau équivalente, ce sont donc les autres facteurs qui vont influencer sur les valeurs enregistrées. Nous avons pensé qu'il serait intéressant de suivre l'évolution de ce critère au cours de notre expérimentation car il permet de mettre en évidence les blés anormaux.

	VARIÉTÉS		
	% 490	% 6007	% 82107
Teneur en eau (%)	13,00	12,80	13,00
Proteine Fondée Grossesorte	10,0	10,0	9,0
Protéine (g/100g)	13,00	16,00	13,00
Cendres (g/100g)	1,27	1,24	1,27
Epilite (g/100g)	1,00	1,27	1,20
Cellulose (g/100g)	1,00	1,00	1,00
Matière BL (g/100g)	100,7	100,5	100,8
PMG (g/100g)	10,0	10,0	10,0
Calibre des grains			
Poids > 2,0 mm	40,0	3,0	40,0
Poids > 1,0 mm	17,0	20,0	17,0
Poids > 0,5 mm	10,0	10,0	10,0
Zéro (moins > 0,25mm)	1,0	10,0	1,0
Alvéolaires			
> 100 µg	10,0	10,0	10,0
< 100 µg	10,0	10,0	10,0
Poids de grains	10,0	10,0	10,0

Tableau 27 : Caractéristiques analytiques des variétés de blé tendre soumises à l'expérimentation

2-2-2-1-2-Paramètres dépendant du développement des insectes et qualité microbiologique.

D'une manière générale, les résultats enregistrés (Tabl. 28 à 30) montrent que la teneur en eau, favorable, et la qualité nutritionnelle appréciable de l'ensemble des variétés ont réduit la variabilité variétale de sorte que l'effectif d'insectes était uniformément élevé au 3ème prélèvement.

Au niveau microbiologique, les échantillons infestés ont conservé une qualité microbiologique acceptable, indiquant que la souche de *S. oryzae* utilisée n'était pas vectrice de microorganismes. Ainsi, l'analyse de variance a montré un effet très hautement significatif des facteurs « Infestation » et « Temps » sur l'effectif et les pertes en poids globales ($P < 0,0001^{***}$) (annexe 1, Tabl. A.1.6). Comme pour l'essai à échelle réduite, l'évolution de ces deux paramètres est parallèle, ce qui est logique ; dans ce

présent essai, le nombre de descendants comme les pertes en poids ont augmenté d'une façon non significative du premier au deuxième prélèvement puis se sont élevés significativement au troisième prélèvement (Tabl. 28). Cependant, le facteur variétal n'a eu aucune influence sur l'effectif de charançons et les pertes globales en poids ($P = 0,820$ et $P = 0,182$ respectivement) en relation, peut-être, avec la composition biochimique et les caractéristiques physiques proches des variétés. La variabilité variétale s'est avérée insuffisante pour induire une différence dans la réponse de la descendance du charançon.

Le contrôle microbiologique, sur le quantitatif et qualitatif, a porté sur une seule variété, *HD1220*, suite à l'indisponibilité des milieux de culture. La sensibilité des trois variétés au charançon étant similaire, nous avons choisi cette variété du fait qu'elle est homologuée et cultivée à grande échelle en Algérie. Les contrôles, réalisés au Laboratoire Central de l'OAIC, ont porté sur deux prélèvements effectués aux temps T_1 (30 j) et T_3 (90 j).

Au niveau quantitatif, le nombre de germes par gramme de grain ou dérivé est un critère de qualité sanitaire ; si ce nombre dépasse la norme requise qui est de 10^5 , les moisissures commencent à être visibles à l'œil nu et le produit devient impropre à la consommation humaine (Cahagnier et Richard -Molard, 1997). Les résultats que nous avons obtenus (Tabl. 29) montrent que les échantillons infestés et témoins ont présenté une qualité sanitaire acceptable, le nombre de germes fongiques par gramme étant compris entre $2 \cdot 10^2$ et $6 \cdot 10^2$. Ceci indique que la souche de *S. oryzae* utilisée n'était pas vectrice de microorganismes.

Au niveau qualitatif, le tableau 30 montre que le % de contamination fongique, assez élevé et similaire pour les échantillons témoins et infestés lors du premier prélèvement (en moy, 72%), a diminué fortement au troisième prélèvement (48%). Ceci est normal du fait de la nature de la flore fongique qui, essentiellement champêtre, décline au cours du stockage où les conditions du milieu ne leur sont plus favorables. Les espèces ainsi identifiées appartenaient à la flore du champ (*Alternaria* sp. et *Fusarium* sp.), à la flore intermédiaire (*Cladosporium* sp., *Acremonium* sp. et *Geotrichum* sp.) ou à la flore de stockage (*Penicillium* sp.).

Variété	Moisson	Don. No. (J)	Moist. (g/100g)	Starch (g/100g)	Cap. (g/100g)	Eff. (g/100g)	Prot. (g/100g)	Crab. (g/100g)	Prot. (g/100g)	A.G. (g/100g)	Ind. (g/100g)
T ₁ (30J)	Tendre	30	101.7	11.28	100	0	0	1.88	11.1	0.1042	499
	Induré	30	101.3	11.28	79	0	0	1.78	10.37	0.1402	3
	Tendre	60	104	11.29	85.2	0	0	1.87	11.10	0.1107	423
	Induré	60	100.3	11.18	82	34	0.02	1.88	10.85	0.1082	443.1
	Tendre	90	104.72	11.29	88.2	0	0	1.85	11.2	0.1181	451.7
	Induré	90	104.27	11.28	78	112.22	0.08	1.78	11.27	0.1032	427.1
T ₂ (60J)	Tendre	30	102	11.18	98	0	0	1.81	10.88	0.1032	477
	Induré	30	101.3	11.28	81.73	0	0	1.74	10.22	0.1271	518.1
	Tendre	60	101.27	11.40	87.3	0	0	1.78	10.28	0.1032	483
	Induré	60	100.3	11.12	88.22	38.22	0.02	1.88	10.88	0.1088	471
	Tendre	90	100	11.5	88	0	0	1.75	10	0.1028	451.1
	Induré	90	101.22	11.15	75	108.72	0.12	1.88	11.18	0.1032	423.1
T ₃ (90J)	Tendre	30	101.7	11.28	100	0	0	1.88	11.1	0.1042	499
	Induré	30	101.27	11.28	78.73	0	0	1.71	11.18	0.1488	483.1
	Tendre	60	100.3	11.25	88.2	0	0	1.88	11	0.1021	484.1
	Induré	60	101.22	11.18	82	108.22	0.08	1.78	11.18	0.1048	442
	Tendre	90	100	11.27	88.2	0	0	1.84	11.1	0.1042	483
	Induré	90	101.3	11.15	88.22	108.72	0.12	1.74	11.12	0.1032	423.1

Tableau 28 : Evolution des caractéristiques analytiques des variétés de blé tendre en cours d'expérimentation (3 niveaux de prélèvement)

Nombre de germes / g de grains	Durée de stockage		
	Moisson (date)	T1	T2
	Sain	2.10 ⁴	3.10 ⁴
Induré	2.10 ⁴	4.10 ⁴	

Tableau 29 : Analyse microbiologique quantitative de la variété HD1220 à T1 (30j) et T3 (90J)

	Série de stockage		
	Sans Infestation	T1	T2
No de contamination des grains fongiques rencontrés sur HD1220	Sain	71%	43%
	Infesté	71%	47%

Tableau 30 : Pourcentage de contamination et genres fongiques rencontrés sur HD1220 à T1 (30j) et T3 (90j) (Méthode Ulster)

2-2-2-1-3-Evolution des paramètres nutritionnels et sanitaires.

Au cours de cet essai, la teneur en eau, de l'ordre de 13 % en moyenne, s'est montrée assez favorable au développement des insectes ; elle était conforme à l'humidité relative que l'on voulait obtenir dans l'étuve, soit 75% (Tabl. 27 et 28). L'analyse de la variance a montré que le facteur « Temps » influait d'une façon très hautement significative sur l'humidification des grains ($P < 0,0001^{***}$) contrairement aux facteurs « Variétés » et « Infestation » ($P = 0,219$ et $0,103$, respectivement) qui n'ont généré aucune différence d'humidification des grains ((annexe 1, Tabl. A.1.6).

Comme pour l'essai blé dur à échelle réduite, au cours du stockage, nous avons constaté un enrichissement relatif en protéines et un affaiblissement de la teneur en matières minérales (Tabl. 28). Ce dernier tableau montre la stabilité, dans le temps, de la faculté germinative des traitements témoins des trois variétés contrairement aux traitements infestés qui ont vu leur pouvoir germinatif diminuer d'une façon très hautement significative dans le temps

($P < 0,0001^{***}$). C'est ainsi qu'en moyenne, ce paramètre a chuté à 62,9 %, le minimum caractérisant la lignée A 440 et dont la faculté germinative a atteint 39 %. L'abaissement de la vigueur des grains peut être dû à la détérioration du germe par les insectes et à la

consommation d'une partie appréciable de l'endosperme au cours du développement larvaire. La contamination par les microorganismes de ces grains rongés ou abritant une forme cachée n'est pas à écarter. La faculté germinative des variétés, particulièrement élevée au départ de l'expérimentation, a subi une réduction uniforme dans le temps qui s'est traduite par une signification nulle ($P = 0,294$).

Un nouveau paramètre a été mesuré, à savoir l'acidité grasse considérée dans le domaine céréalier en tant que critère permettant de mettre en évidence l'état sanitaire des grains et dérivés au cours du stockage. C'est ainsi que l'analyse de variance a montré

un effet très hautement significatif ($P < 0,0001^{***}$) des facteurs « Infestation » et « Temps » sur l'acidité grasse des grains et significatif ($P = 0,020^*$) du facteur « Variété ». Le tableau 28 montre une élévation nette de l'acidification du milieu, du premier au dernier prélèvement, l'acidité augmentant proportionnellement au degré d'attaque du ravageur, ce qui a également été signalé par de nombreux chercheurs (Pingale *et al.*, 1954 ; Venkat Rao *et al.*, 1959 ; Khare *et al.*, 1974 ; Sinha, 1983 ; Anonyme, 1984 ; Imura et Sinha, 1984 ; Demianyk et Sinha, 1987 ; Fourar, 1994). L'infestation des grains par le charançon, et d'une façon générale, par les insectes déprédateurs des stocks, s'accompagne de l'hydrolyse des lipides avec libération d'acides gras qui contribuent à l'acidification et à l'altération du milieu. Ce phénomène peut dépendre du facteur variétal comme nous l'avons observé dans notre essai : la lignée A 440 (V_1) où l'acidification est la plus élevée au troisième prélèvement (0,1912 g H₂SO₄% base MS) s'est démarquée nettement de la variété HD 1220 (V_3) où l'acidité grasse est plus faible (0,1639 g H₂SO₄%). Ceci peut être en relation avec la teneur initiale en lipides de ces variétés. V_1 en est la plus riche (1,93 % base MS) par comparaison à V_2 (1,17 %) et V_3 (1,25 %). Une observation est également à faire en ce qui concerne les traitements témoins dont l'acidité grasse est notable par rapport aux lots infestés (0,120 % et 0,163 % respectivement). Ceci doit être en relation avec une infestation antérieure à notre expérimentation.

Dans le même contexte, le dosage de l'acide urique a montré que cette substance accompagne toujours une infestation par les insectes. Ayant montré dans le précédent essai que la teneur en acide urique était fonction de la sensibilité variétale à l'infestation par les insectes, nous avons voulu mettre en évidence, dans ce présent essai, l'effet de la durée de stockage combinée à l'infestation sur la production de cet acide. Nous avons donc mesuré la teneur en acide urique dans une seule variété, la V_3 (HD1220), et nous avons pu enregistrer son augmentation dans les lots infestés par *S. oryzae*, teneur proportionnelle à la durée de stockage et à l'effectif total de l'insecte (Tabl. 31).

Variété	Niveau d'infestation	Durée de stockage		
		T1	T2	T3
V3 HD 1220	San	21,95	21,78	22,03
	Infesté	25,24	34,75	42,87

Tableau 31 : Concentration moyenne en acide urique (mg/100g/MS) de la variété HD1220 à T1 (30j), T2 (60j) et T3 (90j)

2-2-2-1-4-Evolution des paramètres technologiques.

Sur le plan technologique, la masse à l'hectolitre a connu une réduction au cours du temps. Ce critère officiel de la législation céréalière nationale (Anonyme, 1978) est utilisé pour la réévaluation du prix net des céréales. Selon la valeur de la masse à l'hectolitre mesurée, des réfections ou des bonifications sont appliquées par référence au prix de base du quintal de céréale. L'indice de chute qui constitue, en Algérie, un critère commercial dans les contrats des blés importés, est resté stable dans les conditions de notre essai (Tab. 28).

Nous avons également noté que l'infestation des grains par le charançon a entraîné des pertes pondérales d'autant plus importantes que l'infestation se renforçait et la durée d'entreposage s'allongeait. Ces pertes quantitatives, illustrées par une réduction du taux d'extraction des farines proportionnelle à l'effectif d'insectes et à la durée d'entreposage,

correspondent à la régression de la valeur meunière des grains infestés par *S. oryzae* (Tabl. 32).

Variété	Observation	Niveau d'infestation	Sans Fongicide		Sans Fongicide	
			%	Ratio	%	Ratio
V1 A 447	V11	Sain	47,8	1,1	31,1	23,8
	V12	Infesté	44,7		28,5	
V2 C 1127	V21	Sain	48,1		48,8	23,8
	V22	Infesté	44,1	1,1	27,7	
V3 AG 1127	V31	Sain	48,1	1,1	48,1	23,8
	V32	Infesté	44,1		27,7	

Tableau 32 : Evolution du taux d'extraction des blés tendres au cours de l'expérimentation

2-2-2-1-5-Analyse de l'origine physico-chimique des différences de qualité pour l'insecte.

En considérant des corrélations simples, la matrice de Pearson établie (Tabl.33) nous a permis de noter des corrélations simples significatives et à la limite de la signification entre les variables physico-chimiques des grains et les paramètres relatifs à *S. oryzae*.

- Les pertes globales en poids s'élèvent significativement au cours du temps lorsque l'effectif augmente, ce qui est tout à fait logique (Cc = 0,939).
- L'état d'infestation agit :
 - Positivement sur l'acidité grasse qui augmente significativement dans les grains infestés (Niveau infest-AG, Cc = 0,906 ; Effectif-AG, Cc = 0,765). La première corrélation est plus significative du fait, semble-t-il, que le niveau d'infestation comprend, d'une part, les formes cachées et, d'autre part, les insectes adultes. Il est probable que les formes larvaires, cachées, influent davantage sur l'acidification des grains.
 - Négativement sur la capacité germinative des grains (Niveau infest-Cap Germ., Cc = -0,876 ; Effectif-Cap Germ., Cc = -0,868), entraînant une réduction nette de la qualité sanitaire des grains stockés.

Ces deux critères sanitaires, acidité grasse et capacité germinative, sont significativement et négativement corrélés (Cc = -0,953). En effet, des grains récents, sains et vigoureux présentent une faculté germinative élevée et une acidité grasse basse alors que les valeurs élevées de l'acidité grasse caractérisent des grains mal conservés, douteux ou avariés dont la faculté germinative est faible à nulle.

- Les matières minérales, représentées par les cendres, diminuent d'autant plus que l'effectif augmente (Cc = -0,614) suite au prélèvement de l'endosperme par les insectes.
- Une corrélation positive et significative est à signaler pour la valeur technologique. Il s'agit de la masse à l'hectolitre qui est d'autant plus importante que la masse de 1000 grains est élevée (Cc = 0,932) ; la masse de grains contenus dans un volume

constant sera d'autant plus importante que les grains testés seront gros et /ou denses.

En considérant les corrélations multiples, nous constatons que les commentaires faits précédemment sont bien illustrés par la figure 11 ; nous observons en particulier :

- Une corrélation positive et significative entre les « pertes en poids », « le nombre de descendants » et « l'acidité grasse », groupe qui ressort opposé à la « capacité germinative », aux « cendres » et à « la masse à l'hectolitre » ; le nombre de descendants augmentant au cours du temps, les pertes en poids et l'acidité grasse vont s'élever parallèlement entraînant une altération significative de la capacité germinative des grains et une nette réduction du taux de cendres et de la masse à l'hectolitre, accompagnées de l'élévation de la teneur en protéines.
- la corrélation devient négative et significative entre les deux critères sanitaires « acidité grasse » et « capacité germinative ». Lorsque les conditions de stockage sont défavorables (HR élevée, infestation et/ou infection), il y a acidification et à la réduction de la capacité de germination des grains.
- En relation avec les paramètres biotiques, nous constatons une absence de corrélation pour les variables Poids de 1000 grains (PMG), Lipides, Cellulose et Indice de chute qui ne sont pas bien représentés.

Variable	PMG	Lipid	Cellu	Prot	Gluc	Mass	Temp	Cap	Prot	Acid	Pertes	Acid	Prot	
PMG	1	0,184	-0,080	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,144	-0,744	-0,470	-0,290
Lipid	0,184	1	0,047	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	-0,200	-0,100	-0,100
Cellu	-0,080	-0,047	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Prot	0,000	0,000	0,000	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Gluc	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mass	0,000	0,000	-0,144	-0,100	-0,100	1	0,000	0,000	-0,174	-0,200	-0,100	-0,100	-0,100	-0,100
Temp	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cap	-0,000	-0,000	0,000	0,000	-0,000	-0,000	0,000	1	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000
Prot	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Acid	0,144	0,100	0,000	0,000	0,000	-0,174	-0,200	-0,000	0,000	1	0,000	0,000	0,000	0,000
Pertes	-0,744	-0,200	0,000	0,000	-0,100	-0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000	0,000	0,000
Acid	-0,470	-0,100	0,000	0,000	0,000	-0,100	-0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000	0,000
Prot	-0,290	-0,100	0,000	0,000	0,000	-0,100	-0,100	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000

Tableau 33 : Matrice de corrélations Pearson (n), Blé tendre, Essai à échelle moyenne

groupe. Cette variabilité variétale, assez prononcée en particulier au niveau nutritionnelle, sera intéressante à étudier.

Critères analytiques	VARIÉTÉS		
	V1 Vitron	V2 Vitrif	V3 Vitrifol
T. mou (°C)	11,3	10,7	10,8
PH Faculté Généraliste	96,2	96,2	96,7
Durée (h)	121,02 h	99,9 h	100,9 h
Micre BL (g/100g)	22,8	25,0	18,2
PLG (g/100)	41,7	42,9	41,2
N° de cellules	10,1	1,7	4,1
Protéines (%MS)	13,28	13,42	1,42
Cendres (%MS)	2,24	2,31	2,18
Mécanisme C.M. A.P.	14 11	10,5 10	7 8
Indice de jupon	18,4	18,5	18,8
Indice de base	11,4	11,2	11,4
Indice de base (1)	48	47	46

Tableau 34 : Caractéristiques analytiques des variétés de blé dur soumises à l'expérimentation

2-2-2-2-2-Paramètres relatifs au développement des insectes et qualité microbiologique.

Les facteurs « Infestation » et « Durée de stockage » ont influé très fortement sur l'effectif de charançons et les pertes globales en poids (Tabl. 35) ($P < 0,0001^{***}$). Ces deux paramètres dépendent également du facteur « Variétés » ($P = 0,023^*$ et $0,008^{**}$ respectivement) (annexe 1, Tabl. A.1.7). Ainsi, V₂ s'est montrée la plus sensible à l'infestation avec le nombre de descendants le plus élevé au troisième prélèvement (379,25) par rapport à V₁ (45,5) ; les pertes en poids étaient plus conséquentes pour la première variété et se sont accentuées significativement dans le temps. Une différence très forte de sensibilité variétale à l'attaque du charançon a donc pu être notée. Vitron (V₁) s'est montrée encore une fois assez tolérante

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

à l'infestation comparativement aux deux autres lignées étudiées V₃ et V₂. C'est une variété intéressante à maintenir dans le catalogue des céréales cultivées en Algérie et à étudier pour déterminer les facteurs de cette tolérance ; *Vitron* comprend- elle une substance freinant la multiplication du ravageur des stocks *S. oryzae* ?

Variété	Observation	Date (J)	Moist. RL (g/100g)	Teneur (mg. %)	Glucosid	Perte PD (%)	Coût (F/100)	Ind. Hyg. (J)
V ₁ Vitron	V1 Témoin	40	211.1	12.1	0	0	1.000	118
	V1 infesté	40	211.1	12.18	0	0	1.018	184
	V1 Témoin	40	213.21	12.73	0	0	1.021	184
	V1 infesté	40	211.1	12.89	24.70	0.018	1.017	184
	V1 Témoin	40	209.1	12.48	0	0	1.009	185
	V1 infesté	40	208	12.88	49.2	0.018	1.022	177
V ₂ Alger	V2 Témoin	40	204.84	12.74	0	0	1.014	177
	V2 infesté	39	200.21	12.89	0	0	1.018	181
	V2 Témoin	40	202	12.73	0	0	1.007	177
	V2 infesté	40	201	12.88	78.2	0.018	1.018	185
	V2 Témoin	40	209.74	13.1	0	0	1.019	182
	V2 infesté	40	209.21	13.1	87.28	0.018	1.018	177
V ₃ Protobello	V3 Témoin	39	199.1	12.48	0	0	1.001	172
	V3 infesté	39	199.74	12.89	0	0	1.001	187.3
	V3 Témoin	40	197.74	12.88	0	0	1.001	182
	V3 infesté	40	197.21	12.88	71.28	0.018	1.014	188
	V3 Témoin	40	187	13.1	0	0	1.001	184
	V3 infesté	40	189.21	13.1	211.70	0.018	1.011	171.3

Tableau 35 : Evolution des caractéristiques analytiques des variétés de blé dur en cours d'expérimentation (3 niveaux de prélèvement)

D'un point de vue microbiologique, le contrôle quantitatif a montré que les traitements témoins et infestés de la variété *Protobello* ont conservé une qualité acceptable et que la souche de charançon que nous avons utilisée n'était pas vectrice de microorganismes (Tabl. 36). Au niveau qualitatif, le pourcentage de contamination fongique s'est normalement abaissé dans le temps du fait de la nature essentiellement champêtre de la flore fongique pour laquelle les conditions du milieu artificiel ne lui étaient pas favorables ; les espèces identifiées appartenaient aux genres fongiques du champ (*Alternaria* sp.), à la flore intermédiaire (*Cladosporium* sp., *Geotricum* sp., *Aureobasidium* sp.) ou à la flore de stockage (*Penicillium* sp.) (Tabl. 37).

Niveau de contamination	Durée de stockage	
	T1	T2
Sain	1.10 ²	1.10 ²
infesté	1.0 ²	1.10 ²

Tableau 36 : Analyse microbiologique quantitative de la variété Protobello aux temps T1 (30 j) et T3 (90 J)

	Nom de l'infestation	Densité de contamination	
		T1	T2
% de contamination et genres fongiques rencontrés sur Protobello	leale	42%	10%
	lefaux	10%	11%

Tableau 37 : Pourcentage de contamination et genres fongiques rencontrés sur la variété Protobello aux temps T1 (30 j) et T3 (90 j) (Méthode d'Ulster)

2-2-2-2-3-Evolution des paramètres nutritionnels et sanitaires.

Comme pour l'essai précédant ayant porté sur le blé tendre, nous avons noté une diminution significative du taux de cendres et une production d'acide urique au fur et à mesure que l'infestation s'intensifiait (Tabl. 35 et 38). Au début de l'expérimentation, la teneur en eau des grains, de l'ordre de 12,5%, était assez favorable au développement du charançon. L'analyse de la variance a montré que les facteurs « Temps » et « Variétés » ont influé d'une façon très hautement significative sur l'humidification des grains ($P < 0,0001^{***}$) (annexe 1, Tabl. A.1.7), contrairement au facteur « Infestation » ($P = 0,724$). Ainsi, la teneur en eau des lots infestés était similaire à celle des traitements témoins, ce que nous avons également constaté dans l'essai précédent relatif au blé tendre. Il est constaté qu'au départ de l'expérimentation, les grains des variétés V₂ et V₃ étaient légèrement plus humides que ceux de V₁ ; l'écart a diminué au cours du temps avec le gain d'humidité des grains disposés dans une étuve réglée à 75% HR.

Paramètre étudié		AC (mg/100g Teneur MS)	Co-III	Prob
Densité	T1 (30 j)	11,89	b	0,001***
	T2 (60 j)	11,82	b	
	T3 (90 j)	12,40	a	
Etat de l'infestation	T1=10,2%	11,17	b	0,0001***
	Infesta.T1	14,73	a	

Tableau 38 : Concentration d'acide urique (mg/100g/MS) de la variété Protobello aux temps T1 (30j), T2 (60j) et T3 (90j)

2-2-2-2-4-Evolution des paramètres technologiques.

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

Parallèlement à l'intensification de l'infestation, la qualité technologique a évolué négativement par une réduction de la masse à l'hectolitre, de la valeur semoulière (taux d'extraction) et de la valeur pastière (Tabl. 39, 40), caractéristiques qui sont à la base de la qualité industrielle des blés durs et donc de leur valeur commerciale. Par contre, comme pour l'essai précédent, l'indice de chute (IC > 250s) a montré que tous les traitements étaient et sont restés hypodiastiques (Tabl. 35). Ce dernier tableau montre que la masse à l'hectolitre, au premier prélèvement (T₁), était la plus élevée pour V₁ (212,5 g /250ml ou 85 kg/hl) et la plus faible pour V₃ (199,5 g /250ml ou 79,8 kg/hl). En fin d'expérimentation, ce classement est demeuré inchangé mais avec des valeurs plus faibles, l'infestation ayant agi négativement sur les valeurs de ce paramètre. E effet, l'analyse de variance a montré que les trois facteurs étudiés ont un effet très hautement significatif sur le PS (P < 0,0001***) ((annexe 1, Tabl. A.1.7).

Au troisième prélèvement, l'ensemble des traitements a subi une mouture d'essai qui a permis de mesurer :

- Le taux d'extraction des semoules produites à partir d'un moulin d'essai blé dur (Tabl. 39).
- Les caractéristiques mixographiques. Du fait de l'indisponibilité d'un mixographe, nous avons été obligé limiter le nombre d'essais en éliminant le premier prélèvement (30 j) où l'effet des insectes est logiquement faible pour n'analyser que les traitements du deuxième et troisième prélèvement. Le tableau 40 montre que les témoins ont conservé dans le temps les niveaux des trois critères mixographiques : consistance maximale, temps de développement et affaiblissement de la pâte). Par contre, les traitements infestés, à l'exception de V₁, ont montré un déséquilibre des caractéristiques plastiques : élévation de la consistance et augmentation excessive de la ténacité matérialisée par un élargissement exagéré de la courbe et un dépassement de la zone d'enregistrement. Ceci a été particulièrement confirmé, au troisième prélèvement, pour la variété V₂ qui a connu l'infestation la plus forte. Nous avons également constaté cette élévation de la ténacité dans notre précédent essai à échelle réduite et dans des essais antérieurs sur blé tendre (Fourar, 1987 ; 1994) : l'infestation agit négativement sur la valeur boulangère et pastière des blés par le biais de l'acidification du milieu qui perturbe l'expression rhéologique du gluten (Multon, 1982).

Variété	Observation	Niveau d'infestation	Taux d'extraction (%)		Ténacité (%)	
			T ₁	T ₂	T ₁	T ₂
V ₁ (Témoin)	V ₁ T	Non	85,2	8,2	85,2	8,2
	V ₁ J	Infesté	84,2	8,2	84,2	8,2
V ₂ (Témoin)	V ₂ T	Non	78,2	1,8	78,2	1,8
	V ₂ J	Infesté	57,4	1,8	54,1	1,8
V ₃ (Témoin)	V ₃ T	Non	78,2	8,2	78,2	8,2
	V ₃ J	Infesté	68,2	8,2	68,2	8,2

Tableau 39 : Evolution du taux d'extraction des blés durs au cours de l'expérimentation. Essai à échelle moyenne

Variété	Observations	Niveau d'infestation	Période 1 (P1)			Période 2 (P2)		
			CC (%)	TE (%)	AP (%)	CC (%)	TE (%)	AP (%)
V. Dur	V1	Sain	73	24	21	87	2	18
		Infesté	89,2	1,81	8	84	2	8
V. Dur	V2	Sain	87	8	8	81		
		Infesté	70,2	2,8	7,2	Insaisissable	Insaisissable	Insaisissable
V. Dur	V3	Sain	17	2	7	24	1,31	1,2
		Infesté	74,2	2,21	8,22	81,2	1,87	1,3

Tableau 40 : Evolution des caractéristiques mixographiques des variétés de blé dur au cours de l'expérimentation. Essai à échelle moyenne

2-2-2-2-5-Analyse de l'origine biochimique des différences de qualité pour l'insecte.

A partir de la matrice de corrélation Pearson (Tabl. 41), des corrélations simples significatives et à la limite de la signification sont notées entre les variables physico-chimiques des grains et les paramètres relatifs à *S. oryzae*.

Les principales corrélations simples mises en évidence peuvent être résumées :

- Comme pour l'essai précédent, l'effectif d'insectes est en corrélation positive significative avec les pertes en poids globales ($C_c = 0,910$) et négative et non significative avec le taux de cendres ($C_c = -0,689$) qui diminue d'autant plus que le nombre de descendants augmente.
- La teneur en eau des grains a augmenté au cours de la période expérimentale ($C_c = 0,845$) entraînant l'amélioration des conditions de développement du charançon.
- Au niveau technologique, il ressort que la masse à l'hectolitre Augmente significativement avec le poids de 1000 grains ($C_c = 0,953$) et la teneur en protéines des grains ($C_c = 0,909$). En effet, la masse des grains dépendant de leur teneur en protéines ($C_c = 0,853$), des grains riches en protéines sont denses d'où un PMG élevé. Elle diminue lorsque la teneur en eau des grains augmente ($C_c = -0,561$) : la densité de l'eau étant plus faible que celle du grain, des grains humides, plus volumineux que des grains sains, occupent un volume plus grand d'où réduction de la masse à l'hectolitre.

Le poids de 1000 grains est en corrélation positive avec leur teneur en protéines ($C_c = 0,853$) ; les grains de blé dur sont normalement vitreux, cette vitrosité étant d'autant plus élevée que la teneur en protéines augmente. En effet, l'endosperme de cette espèce comprend essentiellement de l'amidon sous forme de granules dont l'imbrication entraîne des vides qui sont remplis par le gluten, ce qui donne un aspect vitreux aux grains. Dans le cas où la plante, au niveau de la culture, ne dispose pas de suffisamment d'azote pour son alimentation, ces vides sont remplis par de l'air entraînant des plages opaques, farineuses dites « de mitadinage » (Matweef, 1963) : les grains vitreux, plus pourvus en protéines que des grains mitadinés, auront une masse plus élevée et donc un PMG supérieur.

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

- Concernant les corrélations multiples :

La figure 15 montre un groupe de paramètres fortement et positivement corrélés. Il s'agit de la durée, du nombre de descendants, des pertes en poids et de la teneur en eau. Dans le temps, la teneur en eau des grains s'est élevée favorisant le développement des charançons et, par là même, les pertes en poids. A l'opposé, bien représentés par rapport à l'axe F1, se distinguent 2 paramètres, le taux de cendres et la masse à l'hectolitre, qui s'avèrent d'autant plus faibles que le groupe précédemment cité se renforce.

Les paramètres physicochimiques PMG, protéines et taux de mitadinage qui caractérisent les grains uniformément mitadinés des variétés que nous avons expérimentés ainsi que l'activité amylolytique et la dureté ont présenté une absence de corrélation avec les paramètres biotiques. Dans des conditions hygrométriques assez favorables aux charançons, la dureté ne joue plus le rôle de facteur limitant à la multiplication des insectes : son incidence s'estompe.

Paramètre	Durée	PMG	Protéines	Taux de mitadinage	Activité amylolytique	Dureté	Masse à l'hectolitre	Taux de cendres	Teneur en eau	Pertes en poids	Nombre de descendants
Durée	1	0.144	0.485	0.710	0.09	0.088	0.240	0.007	0.079	0.128	0.088
PMG	0.144	1	0.740	0.001	0.000	0.000	0.000	0.440	0.004	0.000	0.000
Protéines	0.485	0.740	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Taux de mitadinage	0.710	0.001	0.000	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Activité amylolytique	0.09	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Dureté	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.120	0.000	0.000	0.000	0.000
Masse à l'hectolitre	0.240	0.000	0.000	0.000	0.000	0.120	1	0.000	0.000	0.000	0.000
Taux de cendres	0.007	0.440	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000	0.000
Teneur en eau	0.079	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000	0.000
Pertes en poids	0.128	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1	0.000
Nombre de descendants	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1

Tableau 41 : Matrice de corrélation (Pearson (n)), Blé dur. Essai à échelle moyenne

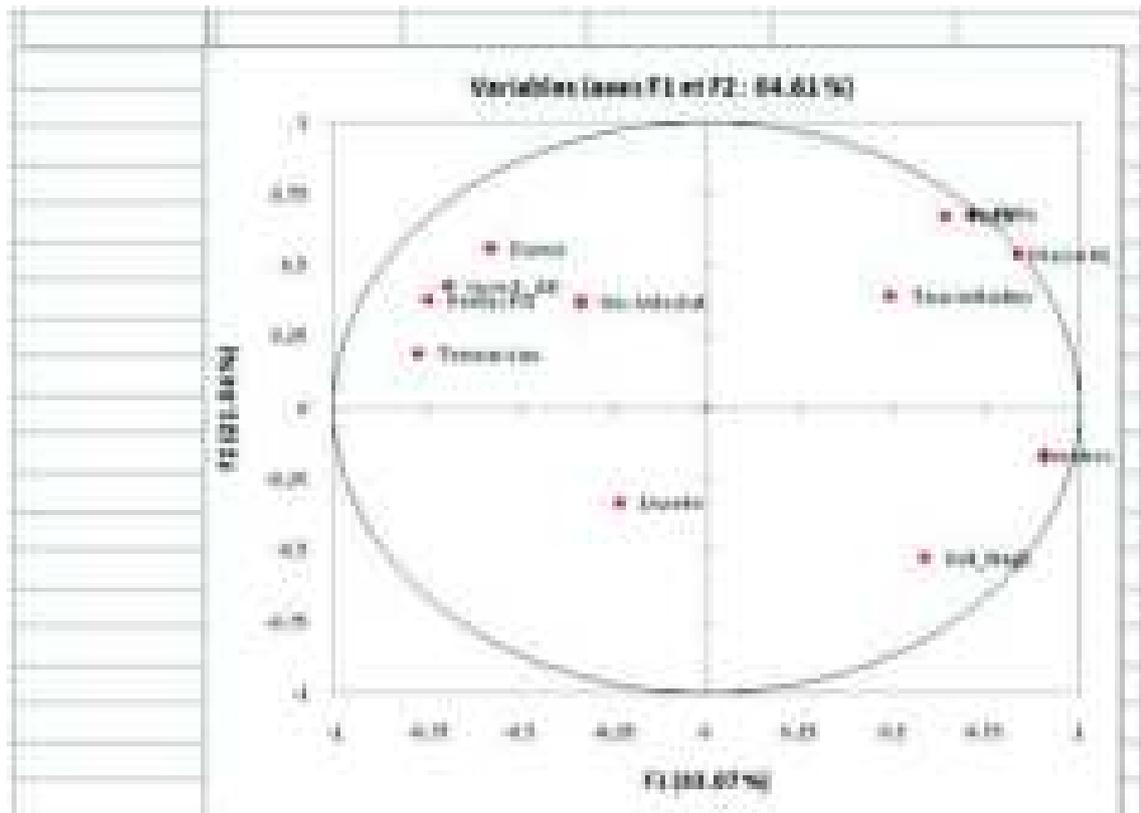


Figure 15 : Diagramme orthonormé représentant la distribution des variables mesurées pendant le stockage à échelle moyenne des grains de blé dur soumis à une infestation par *S.oryzae*, ainsi que leurs interactions (ACP)

2-2-2-3-Comparaison des résultats obtenus entre blés durs et blés tendres

Comme pour l'expérimentation à échelle réduite, nous avons disposé l'ensemble des traitements blé tendre et blé dur dans une même étuve, ce qui nous a permis de comparer les résultats et de mettre en évidence (annexe 1, Tabl. A.1.8) :

- Une différence non significative, au niveau spécifique et variétale, du nombre de descendants et des pertes en poids : dans cette expérimentation où la teneur en eau des grains était supérieure à celle des essais à échelle réduite (12,7 à 13%, 11 à 12,3% respectivement), les variétés de blé sont devenues plus sensibles. Un gain de 1% de teneur en eau peut donc entraîner l'intensification de l'infestation et, donc, du processus d'altération au cours du stockage.
- Un effet similaire sur la qualité par un affaiblissement de la valeur nutritionnelle (prélèvement de matière et réduction de l'efficacité biologique des nutriments), technologique (réduction du « PS », du taux d'extraction et des caractéristiques plastiques) et sanitaire (élévation relative de la teneur en protéines suite à la production d'acide urique par les insectes, acidification poussée).
- Une réduction du % de contamination fongique dans le temps.
- La souche de charançon utilisée était non vectrice de microorganismes.

3-CONCLUSION

De notre expérimentation, il ressort que la teneur en eau est un facteur essentiel dans la protection des grains stockés : la siccité du grain constitue le premier facteur limitant la multiplication des insectes et, par là même, celle des autres bio agresseurs des stocks (acariens, microorganismes) plus exigeants au niveau de l'humidification des grains. D'après Petit (1969) et Cahagnier, Fleurat-Lessard (1996), il existe une teneur en eau de sécurité ou seuil de sauvegarde au dessous duquel le grain peut se conserver pendant une longue durée : pour les céréales, il se situe à 13-14% correspondant à 70 % d'humidité relative à l'équilibre. Cependant, nos essais ont montré que des teneurs en eau, inférieures à ce seuil, peuvent permettre un développement léger du charançon qui s'intensifiera d'une façon exponentielle dans le temps et qui peut donc provoquer la dépréciation industrielle et sanitaire des grains infestés. Du fait de l'hygrométrie basse lors de la culture et de la récolte des céréales en Algérie, le seuil de sauvegarde est généralement respecté, la teneur en eau des grains pouvant même atteindre 10 %. Les grains vont alors constituer un milieu défavorable aux déprédateurs, insectes et microorganismes, et pourront être conservés pendant une longue durée si les conditions de stockage sont correctes et les Bons Principes d'Hygiène (BPH) appliqués.

Du fait que le blé tendre représente la céréale la plus cultivée et la plus commercialisée dans le monde, nous avons choisi, pour la deuxième partie de notre expérimentation, d'étudier cette espèce qui s'est montrée, dans la première partie expérimentale, plus sensible que le blé dur et donc plus difficile à conserver. Dans le cadre du stage doctoral effectué à l'INRA de Bordeaux, France, nous avons pu affiner nos investigations. Cette partie a porté sur des variétés françaises de blé tendre fraîchement produites et entreposées en conditions de stockage à risques (humidité et infestation par *Sitophilus oryzae*). Notre objectif était d'apporter un complément de réponses aux questions posées en début d'expérimentation.

B-DEUXIEME PARTIE. Evolution de la qualité sanitaire et technologique du blé tendre en conditions de stockage à risques (humidité et infestation par *Sitophilus oryzae* L.). Ecologie de la microflore fongique sous l'effet de cette infestation.

1-MATERIELS ET METHODES

1-1-Matériel végétal

L'expérimentation a été réalisée sur trois variétés de blé tendre issues de la récolte 2007 et provenant de trois régions françaises : L'Essonne (Ile de France) pour la variété Caphorn, l'Yonne (Bourgogne) pour la variété Apache, et la Marne (Champagne) pour la variété Crousty. Le choix de ces variétés a été intentionnel : il a été fait avant récolte sur la base d'une caractéristique physique, la dureté, et de leurs aptitudes plastiques (Blé panifiable meunerie française BPMF pour Apache et Cap Horn, blé biscuitier BB pour Crousty).

Dès réception et pour éviter tout risque d'infestation éventuelle antérieure, les grains ont subi une fumigation de désinsectisation totale à la phosphine (PH_3 , $1,5 \text{ g/m}^3$ pendant 5 j) suivie d'un nettoyage mécanique à l'aide d'un nettoyeur séparateur de laboratoire (NSP, ChopinTM, Villeneuve la Garenne, France) puis manuel pour éliminer les impuretés diverses encore présentes dans les lots de blé. Après ces opérations, les caractéristiques physico-chimiques et le calibre des grains ont été déterminés.

1-2-Insectes

Comme pour les essais précédents, la souche *S. oryzae* utilisée pour l'infestation artificielle provenait d'un élevage sur blé tendre conduit à l'unité MycSA du Centre de Recherches INRA de Bordeaux. L'infestation a été réalisée à partir de jeunes couples, émergés depuis une semaine environ, prélevés en cours d'accouplement.

1-3-Conditions de stockage des échantillons de blé

Après le nettoyage des grains, l'homogénéisation et la réduction de chaque lot variétal en échantillons ont été réalisées à l'aide d'un échantillonneur/réducteur (diviseur à rifles modèle INRA, Chopin Technologies[®], Villeneuve la Garenne, France) en vue de constituer les unités élémentaires pour l'expérimentation. Ainsi, pour chacune des variétés de blé choisies, 16 échantillons élémentaires de 1150 g ont été préparés puis placés en bocaux en verre de 1,5 L de capacité, munis de couvercles vissant dans lesquels a été découpée une ouverture circulaire. Un disque grillagé métallique et un autre de papier filtre ont été insérés entre le bocal et le couvercle pour permettre l'échange d'air entre les grains et l'atmosphère du milieu ambiant et éviter l'évasion des insectes ou l'intrusion des acariens.

L'influence de trois facteurs explicatifs a été étudiée : la variété, l'état d'infestation et l'humidité relative (HR), avec quatre échantillons élémentaires par niveau de facteur. Ces derniers ont été placés dans un bac en polycarbonate de 30 L de capacité ('Le Bank'TM, Société Bonnet, Mitry Mory, France). Au fond de celui-ci a été introduit une solution saline saturée destinée à maintenir l'humidité relative souhaitée : 75 % HR avec une solution saline de chlorure de sodium (NaCl) et 85 % HR avec une solution de chlorure de potassium (KCl) (Winston et Bates, 1960 ; Rockland, 1960). Le choix de ces sels est basé sur les résultats d'un essai de simulation de conditionnement que nous avons effectué avant l'expérimentation ((annexe 2, Tabl. A.2.1.). L'ensemble de ces enceintes d'incubation (Le Bank'TM) a été entreposé dans une pièce climatisée à $22,5 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, température favorable sans excès au développement des bioagresseurs étudiés (insectes ou microorganismes fongiques). Ce conditionnement est réalisé durant trois semaines avant l'infestation pour atteindre l'humidité relative d'équilibre et des niveaux équivalents d'activité de l'eau dans les grains. Après ce délai, deux couples de charançons ont été déposés dans chaque unité expérimentale, série « infestée », où ils ont séjourné pendant 12 j dans le grain, durée au terme de laquelle ils ont été retirés par tamisage et éliminés. Au deuxième prélèvement, 75 j après le début de l'expérience, le dosage de la teneur en eau dans les grains ayant montré que l'équilibre entre HR et teneur en eau n'avait pas été atteint, une humidification par brumisation fine des grains avec de l'eau distillée stérile a été effectuée sur chaque unité expérimentale. Nous avons utilisé la quantité d'eau nécessaire pour amener la teneur en eau au même niveau d'équilibre théorique selon l'activité de l'eau (a_w) des grains de blé : 0,75 ou 0,85 (Multon, 1982). L'application par nébulisation fine a été homogène grâce

à l'utilisation d'un appareil spécifique, nettoyé au préalable, utilisé pour la nébulisation des pesticides sur de petites quantités de grain selon la méthode et les conditions suivantes : AFPP, 1996 ; méthode CEB 223 : buse de nébulisation de diamètre 2 mm ; pression d'air $1,5 \cdot 10^5$ Pa ; temps total d'agitation de 4 min ; vitesse de rotation lente de 30 rpm.

1-4-Mode opératoire des prélèvements périodiques.

A la date de contrôle prévue et avant d'effectuer les prélèvements, les bocaux ont été pesés à la balance de précision (à $\pm 0,01$ g) et leur contenu versé intégralement sur un tamis à mailles carrées de 2 mm pour récupérer les insectes adultes qui ont émergé depuis le contrôle précédent. La mesure de la masse à l'hectolitre est alors réalisée à raison de deux répétitions par traitement, effectuées successivement. Le bocal vide et les grains débarrassés des insectes sont ensuite pesés (avec la même précision) pour évaluer les fluctuations de la masse des grains entre deux contrôles successifs. La quantité nécessaire de grain pour effectuer ultérieurement les différentes analyses a été obtenue en puisant à de multiples reprises dans chaque échantillon élémentaire déjà homogénéisé (pendant le tamisage des insectes) à l'aide d'une écope à main. La prise d'essai globale est alors répartie dans des flacons plastiques, préalablement référencés, stériles pour les contrôles microbiologiques, de taille appropriée à la masse nécessaire pour chaque type d'analyse à réaliser. La partie du lot restant à conserver a été restituée ensuite dans son bocal d'origine et l'ensemble bocal-grains a été pesé à nouveau avant d'être remis en incubation jusqu'au contrôle suivant.

1-5-Analyses

Les variables qualitatives mesurées au cours des quatre prélèvements ont été obtenues, dans la majorité des cas, à partir de méthodes normalisées référencées. L'objectif était de suivre l'évolution qualitative pouvant survenir au cours du stockage sur la base du respect des spécifications des trois composants essentiels de la qualité :

- L'état intrinsèque et les caractères physico-chimiques des grains
- L'état sanitaire et son évolution au cours du stockage
- La comparaison entre la qualité technologique initiale et finale

1-5-1-Etat intrinsèque et physico-chimique des grains

Certaines analyses ont été effectuées selon les mêmes méthodes appliquées lors de la première partie expérimentale. Les méthodes normalisées algériennes sont en concordance technique avec les normes françaises, notamment :

- La détermination de la masse de 1000 grains.
- Le dosage de l'eau.
- Le dosage des cendres.
- La détermination de la teneur en cellulose.
- Le calibrage des grains.
- La mesure de l'acidité grasse.
- La détermination de l'indice de chute selon Hagberg.

Certaines analyses ont été effectuées à partir d'autres méthodes ou de matériels spécifiques :

- La dureté des grains, effectuée sur trente grains de chaque variété, a été mesurée à l'aide d'un duromètre (type Pharma-testTM PTB 311) mis à disposition par le laboratoire de Technologie Pharmaceutique de l'Université de Bordeaux II. Cet appareil permet de mesurer simultanément la résistance à la tension d'écrasement du grain exprimée en Newton et l'épaisseur des grains exprimée en mm.
- La masse à l'hectolitre ou « *PS* » a été évaluée avec l'appareil Niléma-litre® de Chopin Technologies (Villeneuve-la-Garenne, France) de 1 L de capacité, mais dont le volume a été réduit à 250 ml. Une étude préalable a permis d'établir un facteur de conversion permettant de ramener les résultats du Niléma-litre modifié à ceux obtenus au Nilémalitre® standard ((annexe 3, Tabl. A.3.1).
- La teneur en azote total a été déterminée par combustion selon la méthode Dumas (méthode PR NF EN ISO 16634) (AFNOR, 2004). Elle permet d'estimer la teneur en protéines brutes en appliquant le coefficient de conversion 5,7 à la teneur en azote total (nutrition humaine).
- La teneur en lipides a été mesurée après extraction à l'oxyde diéthylique selon la norme ISO 11085 (ISO, 2008).
- Le dosage des alkyl résorcinols a été effectué selon une méthode de référence à l'HPLC en phase inverse (RP-HPLC) à l'Unité de Recherche de l'IATE de l'INRA, Montpellier.

1-5-2-Etat sanitaire et évolution au cours du stockage

1-5-2-1-Analyse entomologique et microbiologique

- A chaque prélèvement, la totalité des grains contenus dans les bocaux infestés a été tamisée sur tamis à ouverture de maille de 2,00 mm pour récupérer la population de charançons adultes émergés et en effectuer le comptage. Le dénombrement des formes cachées d'insectes, dans les lots infestés des échantillons déjà tamisés, a été estimé par comptage des grains infestés par une forme cachée (de stade identifié) sur des clichés radiographiques. Ces derniers ont été effectués sur 200 grains prélevés de chaque lot infesté, répartis sur une seule couche (Fig.16). Les radiographies ont été réalisées avec un appareil CGR Sigma 2060TM (distance à la source 60 cm ; tension : 18 kV ; Intensité : 5 mA ; durée d'exposition : 20 s ; film Kodak Industrex M®).
- Comme pour les essais précédents, le pourcentage de grains contaminés par au moins une espèce fongique a été déterminé par la méthode d'Ulster (Cahagnier et Richard-Molard, 1997). La seule différence dans l'application de la méthode a été la désinfection des grains pendant 5 min dans une solution d'hypochlorite de sodium à 10 % au lieu de 10 mn. En outre, dans le cas de la série des traitements infestés, les grains visiblement charançonnés ont été éliminés.

Après le développement des colonies à 25°C (Fig. 17), les espèces fongiques ont été isolées et repiquées sur différents milieux spécifiques pour l'identification des genres et espèces (Fig. 18), décrits par Richard-Molard, 1982 ; David, 1984 ; Cahagnier, 1997 et Champion, 1997 ainsi que l'appui des spécialistes de l'Unité MycSA de l'INRA de Bordeaux.

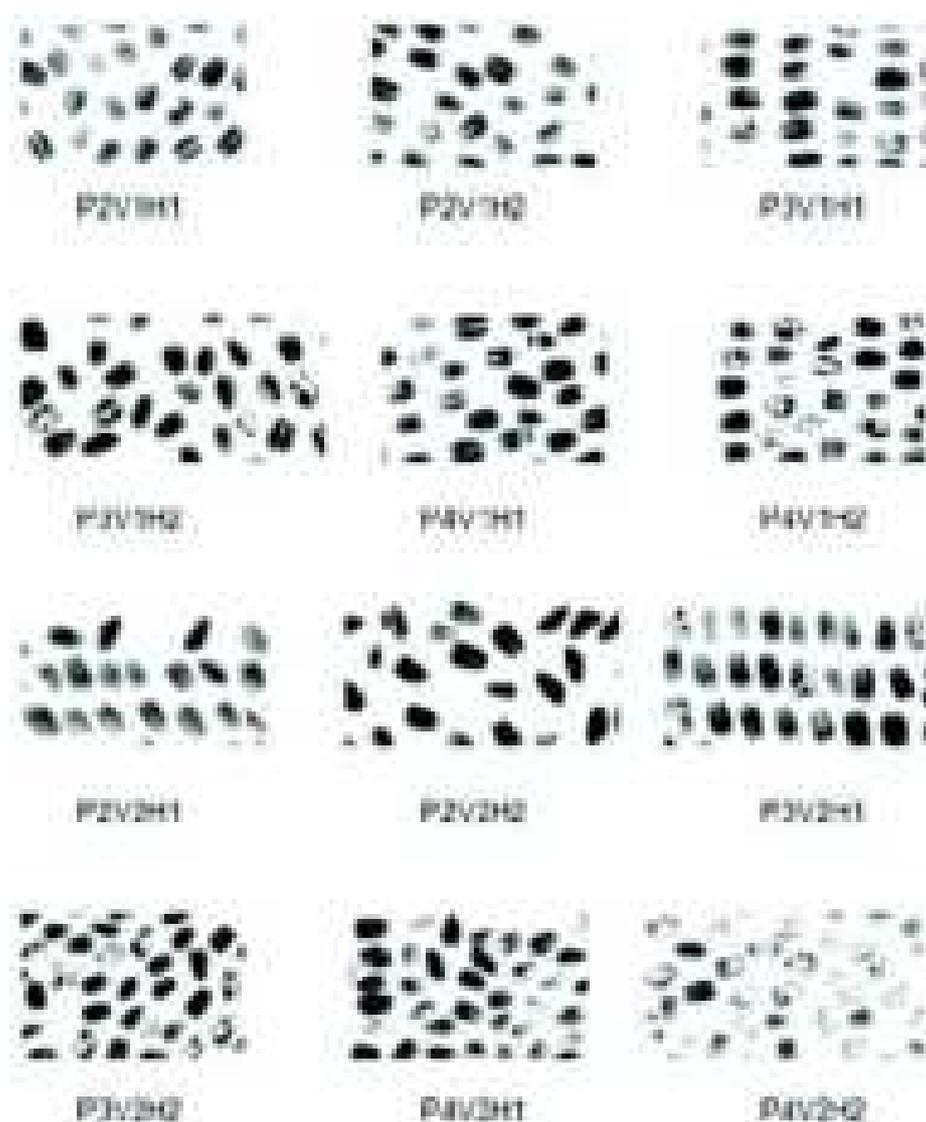


Figure 16 : Radiographie (détails) de grains de blé tendre infestés, variété V1 (Crousty) et V2 (Apache), stockés sous 2 humidités relatives différentes (H_1 : 75%, H_2 : 85%) et à différents prélèvements (P_2 , P_3 , P_4). Les grains portant un stade reconnu du charançon sont marqués pour faciliter le dénombrement (original).

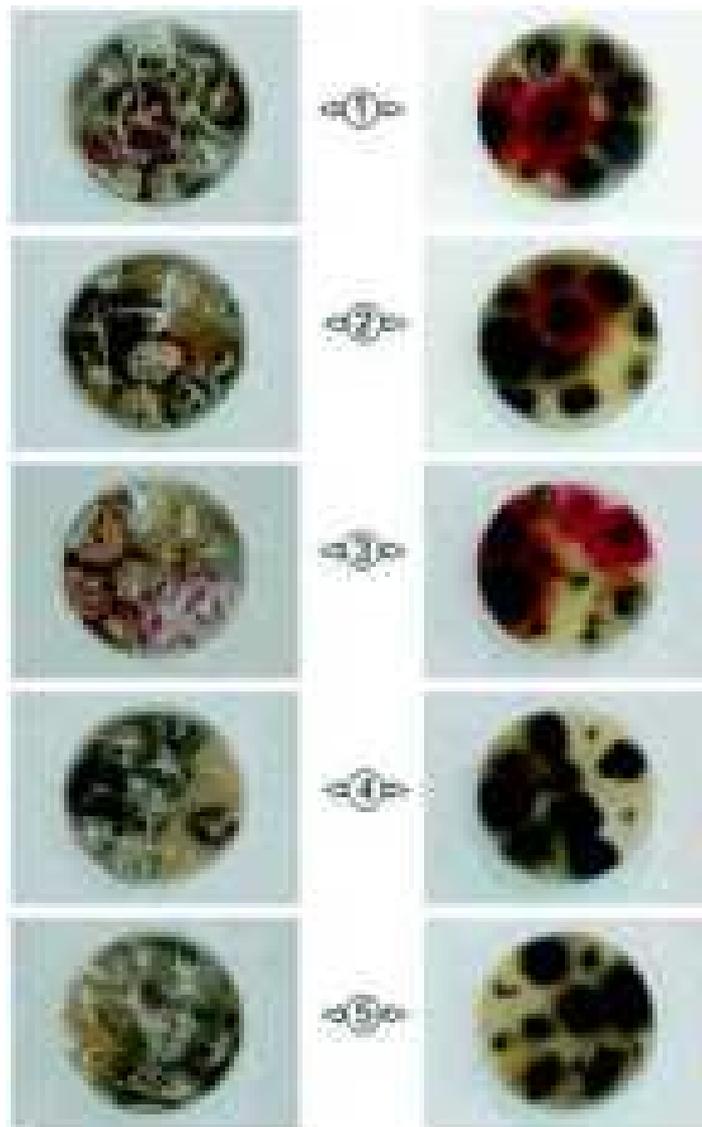


Figure 17 : Boîtes de pétri avec grains contaminés à 100 %(méthode Ulster) par des germes mycologiques divers. Colonne de gauche : Boîtes vues de dessus ; colonne de droite : Boîtes vues de dessous et numérotation permettant la traçabilité et le suivi de chaque colonne.



Figure 18 : Aspect morphologique des principaux genres mycologiques rencontrés lors des contrôles microbiologiques qualitatifs, méthode Ulster (Fleurat-Lessard F., archives personnelles)

Le contrôle microbiologique quantitatif (nombre de propagules / g) a été réalisé selon la méthode NF V08-011 (AFNOR, 1996) en concordance technique avec la méthode normalisée NA 761/1990 que nous avons appliquée dans les essais précédents. A chaque prélèvement, les trois variétés ont subi cette analyse pour une exploitation plus poussée des résultats.

1-5-2-2-Germination

La détermination de la capacité germinative a été effectuée selon la méthode préconisée par l'Association Internationale d'Essais de Semence (ISTA, 1999). Elle consiste à déterminer quotidiennement pendant huit jours le nombre de grains de blé germés normalement, anormalement, moisés ou morts et de les éliminer au fur et à mesure de l'avancée du contrôle dans le temps. Le grain est considéré germé normalement lorsque le coléoptile atteint au

moins 1,5 mm de longueur avec apparition et début de développement normal de la racicule et d'une paire de racines secondaires (Dezfuli *et al.*, 2008). Au début de l'essai, après le conditionnement des lots pendant trois semaines dans les enceintes à HR contrôlée, la détermination de la capacité germinative des trois variétés a été réalisée sur 400 grains par variété. Pendant l'essai, à chaque contrôle, la capacité germinative a été réalisée sur 4 répétitions de 50 grains, soit 200 grains par échantillon. Cette quantité a été montrée suffisante pour obtenir la précision désirée (Wang *et al.*, 1996 ; Joao Abba et Lovato, 1999 ; Wang *et al.*, 2004 ; Kaya *et al.*, 2008).

1-5-2-3-Acide urique

La méthode que nous avons utilisée au laboratoire de biochimie de l'Unité de Mycologie et Sécurité des Aliments (MycSA) de l'INRA, Bordeaux, est basée sur la méthode officielle AOAC (Anonyme, 1990). Le dosage est réalisé en phase liquide par la méthode enzymatique à l'uricase avec mesure de la quinone-imine par spectrophotométrie à 500 nm (490-520 nm). Au préalable, l'acide urique (AU) a été d'abord extrait du grain broyé (ou de la farine) par de l'eau à pH basique. Après hydrolyse par l'uricase, l'AU a été transformé en allantoïne et peroxyde d'hydrogène. Par l'action d'une peroxydase et liaison à un indicateur coloré, se forme la quinone-imine dont l'absorbance est mesurée par spectrophotométrie.

1-5-2-4-Ergostérol

L'ergostérol, constituant spécifique de la biomasse fongique, joue un rôle de marqueur car il permet d'estimer l'état de contamination d'un aliment par la microflore fongique. La méthode appliquée, inspirée de la norme AFNOR V018112, a été revue par l'Unité MycSA de l'INRA, Bordeaux ; l'ergostérol lié est extrait à chaud par une solution méthanolique basique. Une deuxième extraction (liquide / liquide) est alors effectuée avec un solvant non polaire (hexane). Le solvant est évaporé à sec et l'extrait sec repris par un volume donné de phase mobile HPLC avant quantification par chromatographie liquide (détection UV).

1-5-3-Comparaison de la qualité technologique initiale et finale

Les analyses technologiques ont été effectuées au laboratoire Qualité des « Grands Moulins de Paris » (GMP) dont l'usine est localisée à Bordeaux. La détermination du taux d'extraction à la mouture au moulin d'essai a été réalisée au début et à la fin de l'expérimentation sur grains conditionnés à 16% de teneur en eau et repos de 24 h par la méthode 26-95 de l'AACC (Willm, 1997). Chaque échantillon conditionné a été trituré dans un moulin expérimental Brabender Quadrumat[®] Senior. Le taux d'extraction a été évalué à partir de la masse de blé mise en œuvre et de farine produite. Les farines ont été conservées à 5°C dans des récipients en verre, hermétiques, pour les analyses ultérieures. Les taux de gluten humide et sec ont été déterminés sur la base des normes ISO 5531 et 6645 (Afnor, 1982) et le Gluten index par la méthode AACC 38-12 (Anonyme, 1994). L'essai à l'Alvéographe[®] NG (Chopin Technologies, Villeneuve-la-Garenne, France) pour la détermination de la force boulangère (W), de la ténacité (P) et de l'extensibilité ou indice de gonflement (L ou G), a été réalisé suivant la méthode normalisée V03-710 (Afnor, 1982). Un appareil complémentaire, l'Alvéolink[®] (Chopin Technologies), associé à l'alvéographe[®], a permis l'enregistrement des ténacités hors échelle, comme dans les cas de densité d'infestation très élevée ainsi que de l'indice d'élasticité 'le'. Cet indice, égal au rapport de la pression (P₂₀₀) sur la

ténacité maximale (P_{max}), est étroitement corrélé aux propriétés d'élasticité des pâtes, en boulangerie et biscuiterie (Kitissou, 1995).

1-5-4-Construction de l'indice de sensibilité variétale à la détérioration

De multiples modèles de prévision de la durée de conservation des semences sans risque de détérioration de la capacité germinative en fonction des conditions de stockage ont été construits depuis les premières équations développées par Kreyger (1972) et Ellis et Roberts (1980_{a,b}) pour prévoir la baisse de la capacité germinative de l'orge de brasserie. Un peu plus tard, les travaux de Frazer et Muir (1981) ont étendu cette prévision de la vitesse de détérioration aux critères de la qualité commerciale ou d'aptitude à la transformation alimentaire. La base de la prévision dans ces modèles repose sur la détermination de la vitesse de détérioration d'un facteur clé de la qualité comme la capacité germinative (Muir et White, 2001), une caractéristique organoleptique majeure (Bason *et al.*, 1994 ; Wrigley *et al.*, 1994) ou l'élévation de température du grain (Jacobsen et Fleurat-Lessard, 2002). En fixant un seuil critique à cette capacité germinative « acceptable » sur le plan des qualités commerciales et sanitaires et de l'aptitude à la transformation technologique, la durée écoulée jusqu'à cette limite représente effectivement la durée de stockage sans risque.

Il a été choisi dans la présente étude de raisonner sur la sensibilité des variétés étudiées aux deux facteurs montrés les plus importants pour la baisse de l'énergie germinative suivie au cours de la période des 160 j de stockage. L'ajustement des pourcentages de l'énergie germinative moyenne transformés en unités probit par une régression linéaire a été calculé. La sensibilité des variétés à la détérioration qualitative au stockage a été assimilée à la perte d'une unité probit de l'énergie germinative initiale des lots de blé mesurée après 42 j de stockage.

1-5-5-Analyses statistiques

Les logiciels d'analyses statistiques et graphiques multidimensionnelles Xlstat[®] (Addinsoft, Paris, France) et Statgraphics[®] Centurion[□] (extension Uniwin plus 6.0) (Sigma Plus, Levallois-Perret, France) ont permis d'établir les niveaux des corrélations simples et multiples, ainsi que d'effectuer l'analyse de la covariance pour la modélisation par régression multiple de l'évolution de chaque variable dépendante en fonction des variables explicatives. La matrice des corrélations de Pearson entre toutes les variables dépendantes et explicatives a été construite pour apprécier les interactions multiples qui ont fait ensuite l'objet d'une analyse en composantes principales (ACP) pour une interprétation systémique de l'évolution de l'état sanitaire et des qualités technologiques des trois variétés étudiées, en fonction des conditions de stockage et de leurs caractéristiques de structure et de composition. Une seconde analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour faire ressortir l'évolution, dans le temps, des communautés mycologiques dans ces variétés de blé tendre. Une régression linéaire multiple a été calculée, incluant chaque fréquence de genre mycologique, comme une fonction polynomiale des variables explicatives tels la dureté des grains, le niveau d'humidité relative, l'état d'infestation et l'effet spécifique variétal.

2-RESULTATS ET DISCUSSION

2-1-Caractéristiques analytiques des variétés à la réception

A partir des analyses ayant portées sur les paramètres qualitatifs des variétés étudiées (Tabl. 42), les principales différences observées ont été les suivantes:

- La variété Crousty, classée « soft » avec 76,4 N de résistance au duromètre (variable '*Durom*'), était le plus homogène, avec les grains les plus volumineux et une masse de 1000 grains (variable '*PMG*') élevée (51,6 g). La variété Caphorn (classée « medium hard » avec 105 N au duromètre) et Apache (classée « medium soft » avec 91,7 N) avaient un *PMG* similaire (43,3 et 43,4 g) avec un calibre des grains moindre que pour Crousty.
- La masse à l'hectolitre (variable '*PS*') était assez proche pour Caphorn et Crousty (77,8 et 77,9 kg, respectivement) et légèrement plus élevée pour Apache (79,1 kg). Ce paramètre a été conservé dans l'analyse bien qu'il soit sans réelle relation avec les critères de la qualité technologique. Cette mesure demeure, cependant, une détermination commerciale officielle (Tournelle, 2003) qui est utilisée comme critère discriminant pour des lots ayant un *PS* particulièrement faible ce qui permet de les rejeter à l'intervention. Par ailleurs, selon les résultats de la première partie expérimentale, il va constituer un paramètre intéressant du fait que l'infestation des grains par les insectes entraîne une réduction notable de sa valeur.
- Au niveau de la composition biochimique, Crousty présentait la teneur la plus élevée en protéines (variable '*Prot*') (13,6 % de la matière sèche), suivie d'Apache (12,7 %), puis de Caphorn (11,9 %), proportionnellement à la teneur en gluten sec. Au plan des propriétés rhéologiques déterminées à partir de l'alvéographe, la variété biscuitière *Crousty* s'est, cependant, caractérisée par une force boulangère assez faible ($W = 190$), conforme aux caractéristiques d'un blé biscuitier (gonflement très élevé : $G = 27,4$; rapport de configuration très faible : $P/L = 0,25$) par comparaison aux deux autres variétés (W de 240 et 255 pour Caphorn et Apache, respectivement). La farine extraite de la variété Caphorn, forte, avait un gonflement faible à cause de la forte ténacité de la pâte qui s'est traduite par un P/L plus élevé que celui requis en boulangerie ($P/L > 0,6$). La farine extraite de la variété Apache, de force boulangère et gonflement élevés ($W = 255$; $G = 24,5$), présentait un rapport de configuration optimal pour la panification, la viennoiserie ou les coupages ($P/L = 0,51$). L'indice d'élasticité (le) s'est avéré très élevé pour les trois variétés, ce qui est normal pour les blés améliorants Caphorn et Apache ($le = 62,9$ et $62,7$ respectivement) mais excessif pour Crousty ($le = 67,5$), variété biscuitière nécessitant une élasticité moindre. Cet indice est dit optimal en panification française lorsqu'il est compris entre 45 et 55% (Kitissou, 1995). Les valeurs du « gluten index » ont confirmé la force des blés soumis à l'expérimentation. Celle-ci est élevée pour Caphorn et Apache (97,4 %) et moindre pour Crousty (70,8 %) (Perten, 1989).
- Au niveau de l'indice de chute (variable '*IC*'), caractéristique discriminante pour l'activité amylolytique issue d'un début de germination des grains avant la récolte, il était très élevé en début d'expérience pour les variétés Caphorn et Apache ($IC \square 400$ s). Ces deux variétés se sont donc avérées hypodiastasiques, par opposition à la variété Crousty ($IC = 179$ s) qui a présenté une activité amylolytique optimale.
- Au niveau sanitaire, les trois variétés ont montré une énergie et une capacité germinatives (variable '*CapGE*') acceptables pour des blés destinés à la consommation (entre 89 et 92 %). La contamination microbiologique des grains était assez forte, de l'ordre de 100 %, et le nombre de propagules par gramme de

grain supérieur à 10^5 (16.10^5 , 5.10^5 et $6,2.10^5$ pour Caphorn, Apache et Crousty, respectivement), valeur seuil d'altération lorsqu'elle est accompagnée d'une acidité grasse supérieure à $0,06\text{g H}_2\text{SO}_4 / \text{MS}$ pour le blé et l'orge (Cahagnier, 1988). Ces valeurs restent acceptables puisque l'acidité grasse des blés expérimentés ($0,038$; $0,037$; $0,035\text{ g H}_2\text{SO}_4 / \text{MS}$ pour Caphorn, Apache et Crousty, respectivement) étaient bien en deçà de la limite fixée à $0,06\text{ g H}_2\text{SO}_4 / \text{MS}$. Par rapport à la flore fongique, la variété Caphorn s'est montrée la plus contaminée par comparaison aux deux autres blés. Sa teneur en grains mouchetés ($18,5\%$ contre $1,2$ et $3,1\%$ pour Apache et Crousty, respectivement) et en grains ayant germé anormalement étaient également la plus élevée ($8,1\%$ contre 5% pour Apache et Crousty). En effet, différents champignons champêtres sont à l'origine des grains mouchetés caractérisés par des taches brunes ou noires sur le germe ou le péricarpe du grain tel que rapporté par différents auteurs (Ponchet, 1966 ; Scotti et Mont, 1997 ; ITCF, 2001). Cette richesse en microflore est une conséquence directe des conditions climatiques de l'année 2007, particulièrement pluvieuse en fin de cycle végétatif.

Nous précisons qu'au départ de notre étude, les lots d'expérience que nous avons constitués après nettoyage des grains et élimination de certaines impuretés (matières inertes, graines étrangères, grains cassés, grains germés) étaient d'aspect sanitaire homogène et propres à l'expérimentation.

		Temps		
		Capot	Agave	Onion
Sécheresse	Teneur en eau (%)	12,05	13,5	12,7
	Glucose (100 g sécheresse/g)	46,3	46,4	45,8
	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Féculose	Matière amylacée (%)	18,2	17,2	18
	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (grain %)	18,2	17,2	18
Féculose	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (grain %)	18,2	17,2	18
Sécheresse	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Féculose	Matière amylacée (%)	18,2	17,2	18
	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (grain %)	18,2	17,2	18
Féculose	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Sécheresse	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Féculose	Matière amylacée (%)	18,2	17,2	18
	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (grain %)	18,2	17,2	18
Féculose	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Sécheresse	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Féculose	Matière amylacée (%)	18,2	17,2	18
	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (grain %)	18,2	17,2	18
Féculose	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Sécheresse	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29
Féculose	Matière amylacée (%)	18,2	17,2	18
	Féculose (matière %)	18,2	17,2	18
	Féculose (grain %)	18,2	17,2	18
Féculose	Glucose (matière %)	1,28	1,11	1
	Glucose (eau %)	1,51	1,58	1,58
	Glucose (grain %)	1,27	1,18	1,29

Tableau 42 : Caractéristiques physico-chimiques et biochimiques, état sanitaire et propriétés technologiques des trois variétés de blé étudiées, à réception, immédiatement après la récolte (2007)

2-2-Evolution des paramètres étudiés

2-2-1-Teneur en eau

Les grains présentaient une teneur en eau entre 12,05 et 13,5 % à la réception (Tabl. 42) ; cette teneur s'est graduellement élevée dans le temps pour atteindre en fin d'expérimentation des valeurs correspondant au niveau d'équilibre avec l'humidité relative (*HR*) maintenue dans l'enceinte de conservation (Tabl. 43). Nous constatons que, jusqu'au deuxième prélèvement, la teneur en eau des grains pour chacune des variétés est restée très voisine dans les deux conditions d'humidité relative. La reprise naturelle d'humidité des grains au contact de l'*HR* de l'air dans les enceintes s'étant avérée plus lente que prévue par un essai préliminaire de simulation réalisé en plus petit volume (voir annexe 2, A.2.1). Ce qui nous a amené à humidifier les grains en cours d'expérimentation pour atteindre les

humidités relatives retenues. La ré humidification directe des grains par brumisation d'eau stérile, effectuée après 75 jours de conservation, a permis de remonter les teneurs en eau à l'équilibre théorique de 14,5 % et 16 % avec les HR de 75% et 85%, respectivement (voir § 1.3. et Fig. 19).

L'analyse statistique a montré que la durée de stockage constitue le facteur qui influence significativement le niveau d'équilibre atteint entre teneur en eau du grain et HR ($t = 8,172$; Coefficient de corrélation (C_c) = 0,67 ; $P < 0,0001^{***}$) suivie de la variance issue de la variété ($t = 4,073$; $P = 0,000^{***}$), du niveau d'humidité relative équivalente ($t = 3,485$; $C_c = 0,29$; $P = 0,001^{***}$) et de la condition d'infestation ($t = 3,115$; $C_c = 0,26$; $P = 0,003^{**}$) (Tabl. 44 et 45). La construction du modèle de régression de la variable « teneur en eau » a montré que l'influence des variétés constitue la seconde source de variation après la durée de stockage, plus précisément pour le cas d'Apache qui influe significativement sur ce critère (Tabl. 46). Ainsi, le stockage prolongé en conditions d'HR supérieure à l'activité de l'eau des grains a entraîné une augmentation de la teneur en eau des grains (naturelle ou faisant suite à l'addition d'eau après 75 j de conservation) jusqu'à son niveau d'équilibre. Celui-ci a été observé stable à partir de 124 j de stockage, résultat en accord avec Imura et Sinha (1984). L'importance de la variété Apache dans la variabilité est à relier à un niveau d'équilibre de la teneur en eau qui s'est stabilisée à un niveau plus élevé que celui des deux autres variétés. En fin de stockage, la teneur en eau de la variété Apache était supérieure de 1 à 1,2 % à celle des deux autres variétés (Tabl. 43).

Ce résultat montre que la capacité d'hydratation des grains de la variété *Apache* est significativement plus importante que celle des deux autres. Dans les enceintes infestées par *S. oryzae*, l'augmentation de la teneur en eau des grains a été en outre influencée par la transpiration des insectes (en particulier, au cours du dernier mois de stockage lorsque la densité dépassait 1000 insectes par kg), phénomène également constaté par Darmaputra *et al.* (1994). Les tableaux 43 et 44 et les figures 19 et 20 montrent que, dans les conditions de la présente expérimentation, les insectes ont provoqué une élévation significative de la teneur en eau ; à partir de 124 j de stockage, il a été observé une augmentation d'un point de teneur en eau en moyenne dans la série infestée, quelle que soit l'HR d'équilibre.

Variété	CapHorn									
	Teneur en eau (%)				Insectes / kg					
	Terrain sain		Lots infestés		Adultes libres		Formes cachées		Total	
Durée de stockage	HT	H2	HT	H2	HT	H2	HT	H2	HT	H2
J0 + 42 j	12,75	12,85	12,85	13,2	0	0	117	55	117	55
J0 + 75 j	13,55	13,25	13,5	13,5	75	59	0	30	75	119
J0 + 104 j	13,65	15,35	14,87	15,45	545	1405	431	86	977	1504
J0 + 150 j	13,65	15,25	15,27	15,7	491	230	1395	5147	1587	5277
Variété	Apache									
Variété	Teneur en eau (%)				Insectes / kg					
	Terrain sain		Lots infestés		Adultes libres		Formes cachées		Total	
	Durée de stockage	HT	H2	HT	H2	HT	H2	HT	H2	HT
J0 + 42 j	14	14,05	14,3	14,4	0	3	55	33	55	55
J0 + 75 j	14,5	14,35	14,5	14,55	66	117	0	204	66	326
J0 + 104 j	14,5	15,7	15,3	15,55	2056	2472	323	105	2382	2575
J0 + 150 j	14,75	15,55	15,7	20,55	253	195	10545	5505	10795	17153
Variété	Crousty									
Variété	Teneur en eau (%)				Insectes / kg					
	Terrain sain		Lots infestés		Adultes libres		Formes cachées		Total	
	Durée de stockage	HT	H2	HT	H2	HT	H2	HT	H2	HT
J0 + 42 j	13,2	13,7	13,55	13,55	0	0	147	200	147	200
J0 + 75 j	13,5	14,3	13,9	14,05	50	55	53	254	145	309
J0 + 104 j	14,47	15,55	14,5	15,7	650	2054	492	511	1442	2565
J0 + 150 j	14,5	15,5	15,3	15,75	332	404	3315	3111	3647	3515

Tableau 43 : Evolution de la teneur en eau des grains de trois variétés de blé stocké à 22-23°C dans deux HR différentes pendant 160 j, avec ou sans infestation par *S. oryzae* (effectifs observés aux contrôles successifs)

Après 160 j de stockage, les populations très élevées d'insectes (2000 – 3000 insectes au kg) ont provoqué une élévation moyenne de teneur en eau de 2 %, dépassant les 5 % dans la variété hébergeant les plus fortes populations d'insectes (Apache) et à 85 % HR. Ainsi, il a pu être mis en évidence une différence significative de comportement variétal vis-à-vis de l'absorption d'eau atmosphérique par les grains en cours de stockage. Les variétés CapHorn et Crousty se sont comportées moins hygroscopiques que la variété Apache. Ceci est confirmé par le test de la différence des moindres carrés (LSD) qui met en évidence deux groupes de comportement hygroscopique significativement différents : Apache, groupe A et CapHorn et Crousty, groupe B (Tabl. 46). Cette plus ou moins grande sensibilité des grains à l'hydratation en milieu humide s'est avérée en relation directe avec la sensibilité à la détérioration qualitative pendant le stockage. Il a été avancé l'hypothèse que cette variation d'hygroscopicité entre les variétés de blé pourrait trouver son origine dans la teneur en alkylrésorcinols, lipides phénoliques, présents en grande partie dans les tissus périphériques du grain et dont les propriétés hydrophobes sont susceptibles d'influencer l'échange d'eau entre l'humidité relative externe et l'activité de l'eau dans le grain (Landberg *et al.*, 2008 ; Abecassis, *communication personnelle*). Il a donc été choisi d'intégrer cette variable « compositionnelle » dans la construction de l'indice global d'aptitude des variétés de blé à la conservation, sans risque de détérioration qualitative.

2-2-2-Evolution de la population d'insectes adultes et sous formes cachées.

Le nombre d'insectes adultes était pratiquement nul lors du premier contrôle après seulement 42 j de stockage, à l'exception de la variété *Apache* où il a été retrouvé trois individus par kg en moyenne. L'effectif d'adultes aux contrôles ultérieurs s'est élevé de façon exponentielle, en corrélation significative avec la durée de stockage ($t = 1,98$; $P = 0,05^*$) (Tabl. 44 & Fig. 21). Cette corrélation s'est avérée plus forte dans le cas des effectifs de formes cachées (larves, nymphes, imago) ($t = 3,044$; $P = 0,004^{**}$). Les taux d'accroissement des populations de *S. oryzae* permettant de quantifier la sensibilité à la multiplication des insectes ravageurs primaires (de type charançon à formes juvéniles logées à l'intérieur du grain) sont positivement corrélés à la teneur en eau des grains ($t = 3,115$; $P = 0,003^{**}$). Ainsi, le taux net de multiplication d'insectes adultes et de formes cachées pour les trois variétés à 125 j est significativement plus élevé pour les grains stockés à 85 % HR qu'à 75 % HR (Tableaux 47 et 48). Le niveau de la population d'insectes adultes et sous forme cachée se présente sous forme d'une courbe exponentielle en fonction de la durée de stockage et du taux moyen d'accroissement / j des populations, qui a pu être modélisée (Fig. 21 et 22). Ces modèles ont permis de comparer le taux d'accroissement naturel des populations de *S. oryzae* dans chaque

modalité d'expérience, selon la procédure de calcul utilisée antérieurement (Fleurat-Lessard et Poisson (1984) ; Sanchez-Martinez *et al.*, 1997). L'analyse statistique a montré que, dans les conditions de notre expérimentation, cette dynamique de multiplication des insectes est influencée positivement par la durée de stockage et la teneur en eau des grains (Tabl. 44). L'analyse statistique multidimensionnelle a montré que la variable « insectes totaux » (somme des densités d'adultes et de formes cachées, abrégée '*InsTOT*') est corrélée significativement avec les variables : capacité germinative (Coefficient de corrélation $Cc = -0,95$), acide urique ($Cc = 0,94$), acidité grasse ($Cc = 0,92$), *PS* ($Cc = -0,89$), teneur en eau ($Cc = 0,81$), germes totaux ($Cc = 0,74$) et durée de stockage ($Cc = 0,43$) (Tabl. 45).

Selon Hagstrum et Millikem (1988), le niveau d'influence relative de facteurs sur le développement de neuf espèces de coléoptères dont *S. oryzae*, est représenté par la température, comme facteur principal, suivie par la teneur en eau, puis par le régime alimentaire. Dans notre essai, deux de ces trois facteurs ont été fixés à l'optimum, ce qui a donné aux facteurs 'teneur en eau' et 'durée de stockage' une influence primordiale. Dans une étude antérieure menée par d'autres chercheurs, il a également été choisi le modèle exponentiel pour modéliser les profils d'émergences cumulées de *S. oryzae* dans différentes espèces du genre *Triticum* à température et teneur en eau constantes (Trématerra *et al.*, 1996). L'introduction du facteur 'teneur en eau' des grains dans le cas présent est déterminant pour une comparaison précise de la sensibilité de différentes variétés à la détérioration par les insectes, sur la base du taux d'accroissement des populations dans un grain à activité d'eau contrôlée. Toutefois, d'autres facteurs, comme une composition biochimique différente des variétés ou des niveaux de digestibilité différents des nutriments, peuvent interférer avec ces variables « à effet majeur ». Ainsi, Nawrot (1981) a montré que la présence de composés antinutritionnels pouvait être à l'origine de fluctuations de la fécondité des femelles du charançon des grains (*S. granarius* L.), entraînant des différences de dynamique des populations de cet insecte selon les variétés.

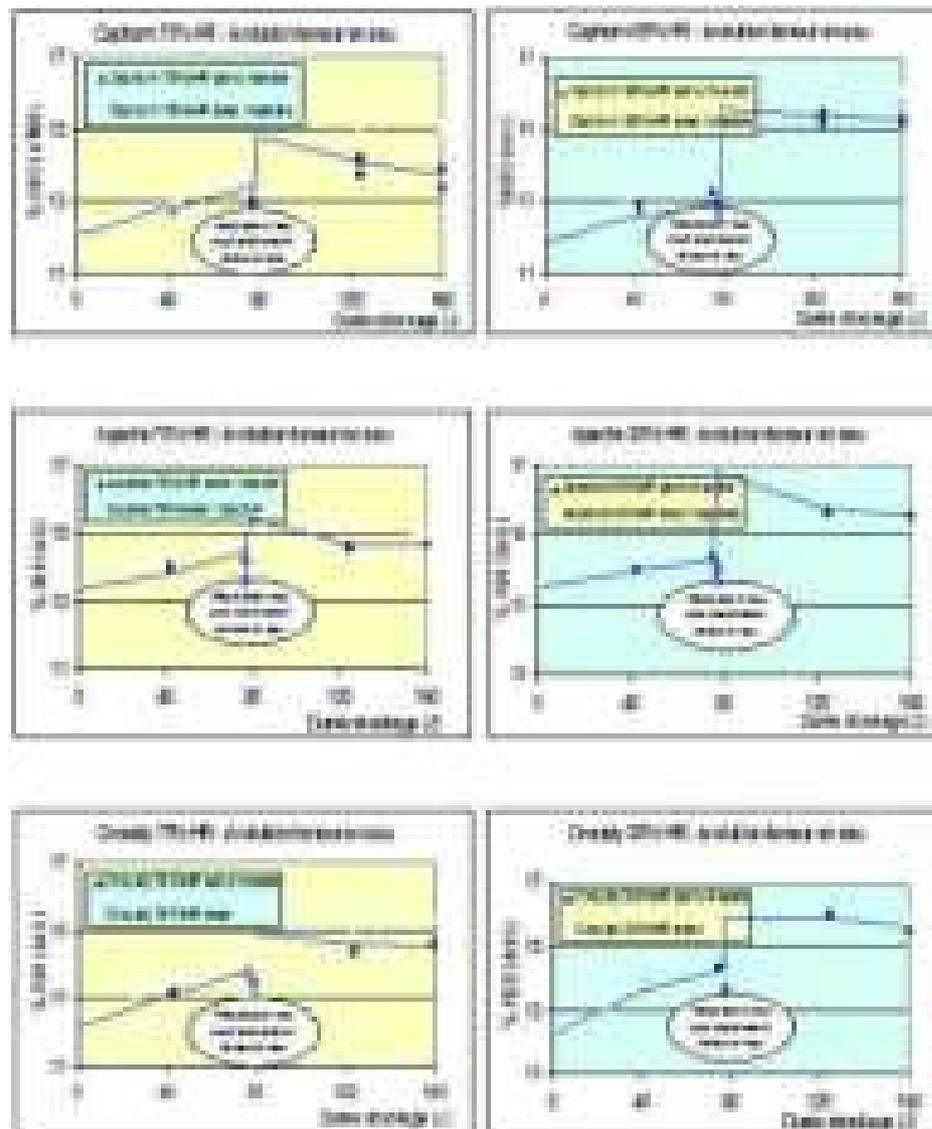


Figure 19 : Evolution de la teneur en eau des trois variétés dans deux conditions d'humidité relative d'équilibre différentes, avec et sans infestation par *S. oryzae* au cours d'une période de stockage de 160 jours (23 semaines) à 22-23°C.

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

variables qualitatives *	R ² ajusté variable	Densité		HR Equilibrée		Inhibiteurs naturels				
		Valeur	P < 0,05	Valeur	P < 0,05	Valeur	P < 0,05			
Teneur en eau	0,282***	-0,01	< 0,01	0,238	0,076	0,488	0,001***	-0,008	0,118	0,003**
Densité gammatrice	0,411***	0,02	0,103	0,8	0,004	-0,074	0,114	-0,071	-0,08	0,007**
Densité matrice starche	0,120**	-0,08	< 0,01	0,074	0,008	0,002	0,011	-0,008	0,002	0,002**
Inhibiteurs naturels PHTHBT	0,045**	-0,08	< 0,01	0,08	0,008	0,073	0,009	-0,018	0,002	0,010*
Score premier G de grain	0,034 NS	0,08	0,002	0,175	0,008	0,002	0,022	0,008	0,002	0,008
% de l'humidité temporelle	0,282***	0,102	0,013	0,000***	0,003	0,073	0,008	0,488	0,488	0,048
Score grain	0,071**	0	0,108	0,08	0,071	0,002	0,01	0,01	0,072	0,008
Score H ₂ O	0,07**	-0,04	< 0,01	0,178	-0,008	-0,007	0,0047	-0,008	-0,18	0,010*
Score score regress	0,438***	0,178	0,028	< 0,000***	-0,028	-0,004	0,004	0,128	0,08	0,001

*** R² < 0,001 ** R² < 0,01 * R² < 0,05 - R² < 0,10 NS NIVEAU DE SIGNIFICATION NULLE (0,4320)

Tableau 44 : Modélisation des principales variables qualitatives dépendantes, par de multiples corrélations, au cours de 160 j de stockage de trois variétés de blé à 22-23°C, dans deux HR différentes et en présence ou en absence d'insectes, *S. oryzae* (quatre variables quantitatives explicatives et une variable qualitative : la variété). Les paramètres des modèles linéaires (polynomiaux) sont indiqués en tant que « valeur » avec le niveau de signification de la déviation à partir de la moyenne (le terme constant de l'équation n'a pas été inclus).

Variables explicatives + variables Dépendantes	R ² ajusté valeur	Durée stockage			Variété (global)		
		Valeur	t	Pr. > t	Valeur	t	Pr. > t
Teneur en eau	0,200***	0,02	8,172	<0,0001***	0,055	-4,973	0,000***
Densité germination	0,411***	-3,171	-4,128	0,000***	-3,132	-2,164	0,040**
Densité insectes adultes	0,781**	3,278	1,88	0,06*	121,8	0,788	0,448
Insectes formés cachés	0,343**	25,025	0,044	0,004**	1553,8	1,717	0,092
Taux germes de grain	1,334***	13,891	1,363	0,18	441,75	0,895	0,366
Contamination fongique	12,202***	-0,928	-0,258	<0,0001***	-2,13	-2,027	0,040**
Autres grains	0,177**	0	0,214	0,003**	0,008	1,528	0,131
Masse H ₂ O	0,5***	-0,037	-4,728	<0,0001***	-0,295	-0,358	0,722
Insectes Moyens	0,495***	-3,352	-2,158	0,030*	107,27	0,87	<0,0001***

***=P < 0,001, **=P < 0,01, *=P < 0,05, -=R² valeur dans modèle de régression multiple (3, 42 df)

Tableau 44 (suite) : Modélisation des principales variables qualitatives dépendantes, par de multiples corrélations, au cours de 160 j de stockage de trois variétés de blé à 22-23°C, dans deux HR différentes et en présence ou en absence d'insectes, *S. oryzae* (quatre variables quantitatives explicatives et une variable qualitative : la variété). Les paramètres des modèles linéaires (polynomiaux) sont indiqués en tant que « valeur » avec le niveau de signification de la déviation à partir de la moyenne (le terme constant de l'équation n'a pas été inclus).

Tableau 45 : Matrice des corrélations deux à deux (Pearson) entre variables dépendantes et explicatives de l'évolution des caractéristiques qualitatives de trois variétés de blé conservées à 22-23°C, dans deux conditions d'HR différentes, et en présence ou en absence d'insectes (*S. oryzae*) pendant une période de 160 j.

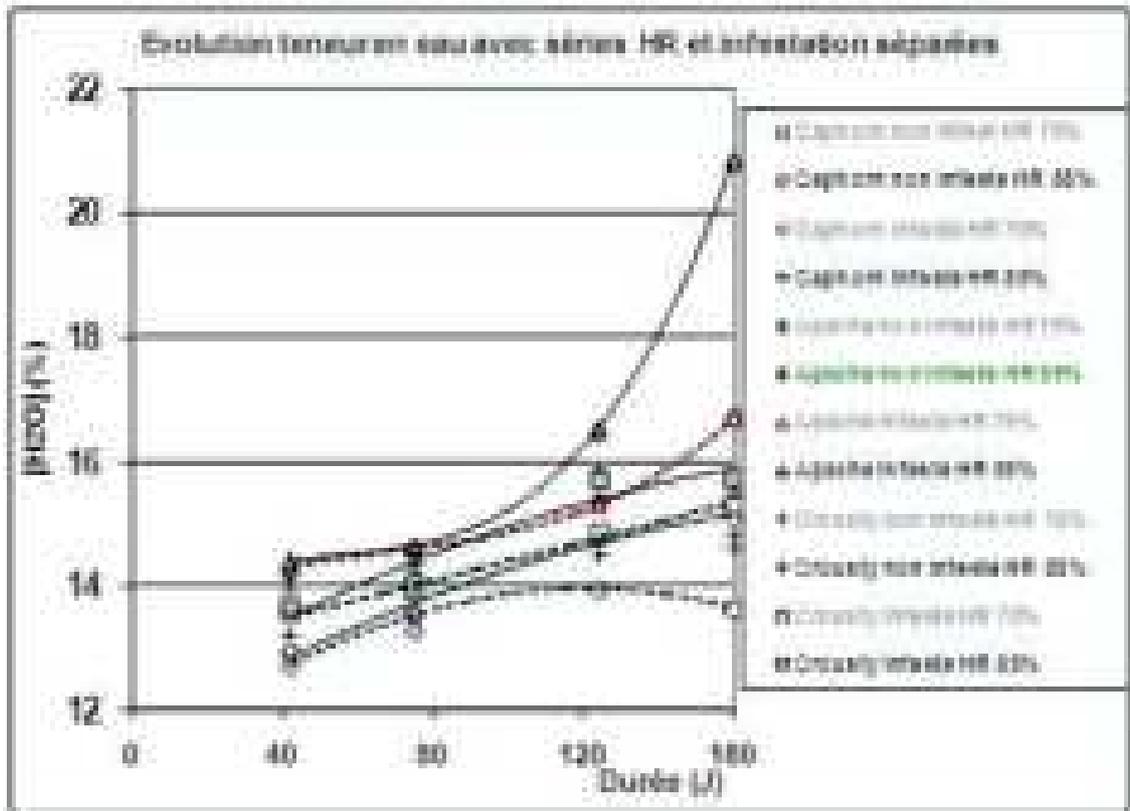


Figure 20 : Evolution de la teneur en eau de trois variétés de blé tendre au cours des 160 j de stockage à 22-23°C, dans deux conditions d'humidité relative (75 et 85 %) et en présence ou non d'une infestation par le charançon *Sitophilus oryzae* (les courbes de tendance ne sont représentées que pour les séries avec insectes)

Contraste	Différence	Différence standardisée	P < 0,05	Modalités	Moyennes	Groupes
Apache vs Caphorn	1,118	4,083	0,000	Apache	15,304	A
Apache vs Crousty	0,788	2,883	0,006	Crousty	14,528	B
Apache vs Caphorn	0,891	1,31	0,388	Caphorn	14,185	B

Tableau 46 : Analyse de variance (Fisher, LSD) de la teneur en eau en fonction de la variété et de la durée de stockage des trois variétés de blé tendre étudiées (Caphorn, Apache et Crousty) (intervalle de confiance à 95%).

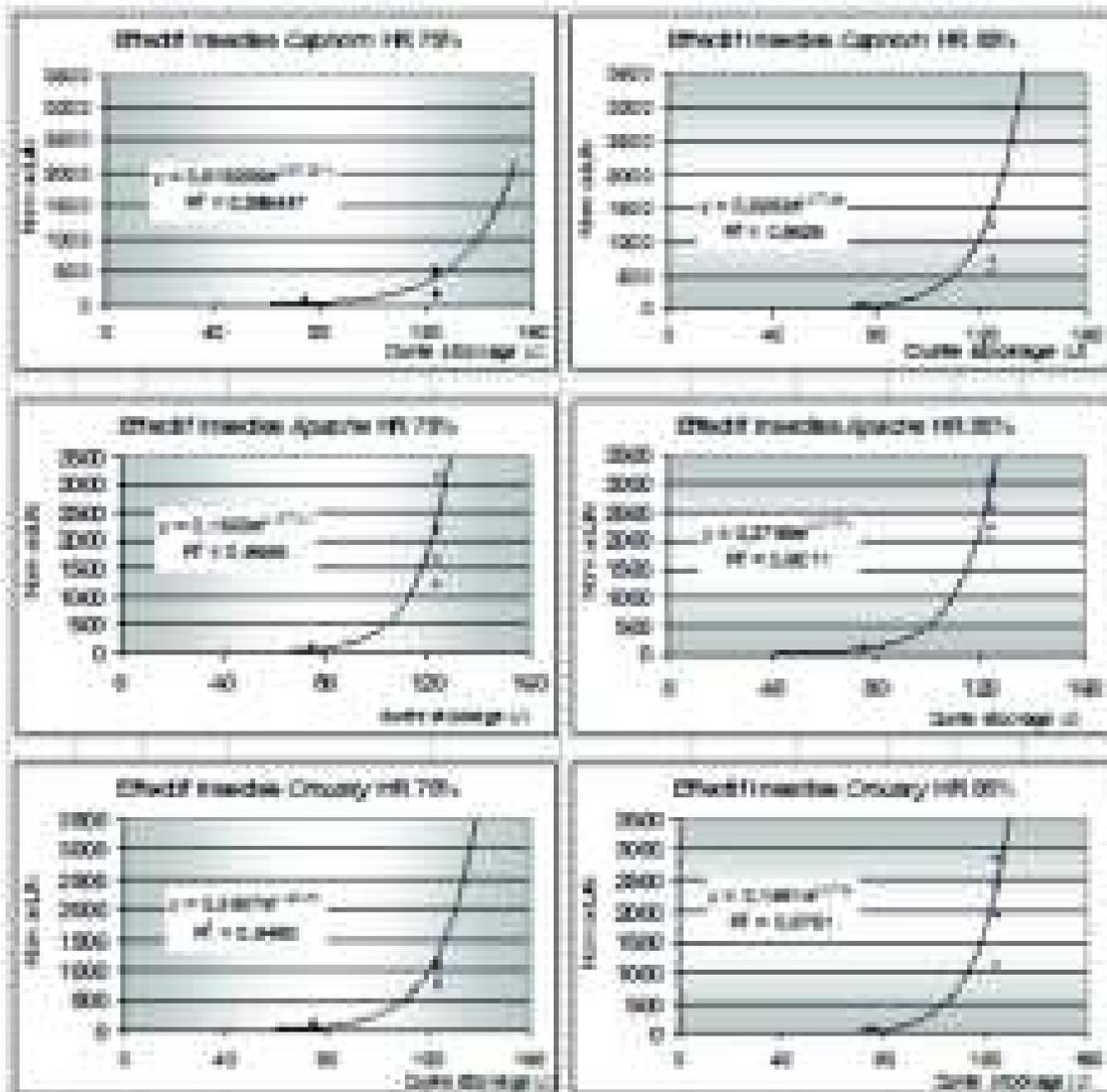


Figure 21 : Modèles exponentiels de dynamique des populations de *S. oryzae* (adultes) au cours de leur multiplication pendant 124 j dans trois variétés de blé, à deux HR et à 22-23°C

Variété	Humidité relative d'équilibre	Fonction exponentielle de dynamique de population	Taux net de multiplication à 124 j	Capacité biologique accrue (j ⁻¹) (mg)	Coefficient de détermination R ²
Caprene	HR 75%	$y = 0.00029 e^{0.00015x}$	144	0.0473	0.97
	HR 85%	$y = 0.1293 e^{0.0001x}$	494	0.0555	0.94
Aquata	HR 75%	$y = 0.1628 e^{0.0001x}$	794	0.0628	0.97
	HR 85%	$y = 0.1768 e^{0.0001x}$	873	0.0619	0.95
Croisy	HR 75%	$y = 0.1897 e^{0.0001x}$	418	0.0487	0.95
	HR 85%	$y = 0.1493 e^{0.0001x}$	718	0.0518	0.95

Tableau 47 : Modèle exponentiel de l'accroissement des populations d'adultes de *S. oryzae* dans trois variétés de blé tendre de dureté différente : comparaison des paramètres du taux intrinsèque d'accroissement naturel (r_m) [$dN/dt = N_t - N_0 (e^{r_m t})$]

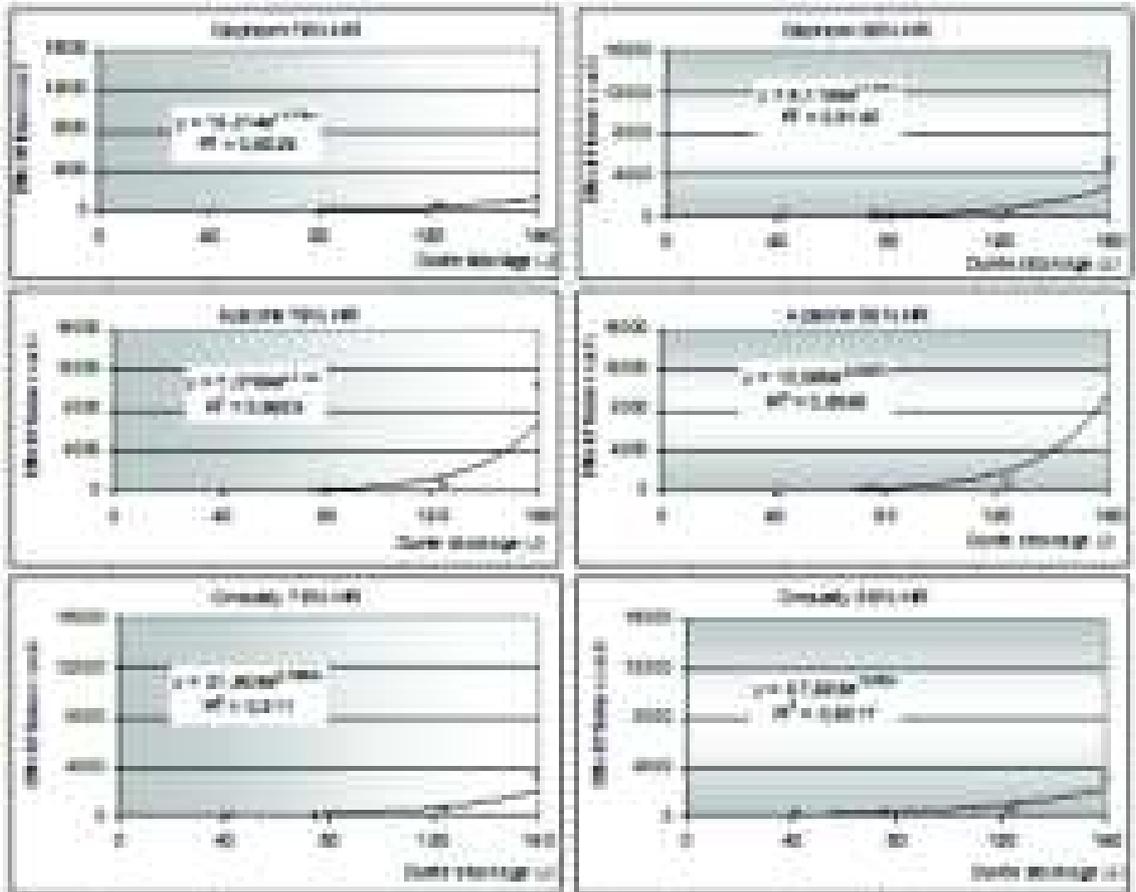


Figure 22 : Modèles exponentiels de dynamique des populations de *S. oryzae* (formes cachées) au cours de leur multiplication pendant 160 j dans 3 variétés de blé, à deux HR et à 22-23°C

Variété	Humidité relative d'équilibre	Fonction exponentielle de dynamique des populations	Temps net de multiplication à 124 j	Capacité intrinsèque accrue (ind/g)	Coefficient d'évaluation R^2
Caplène	88,75%	$y = 10,204e^{0,0017x}$	461	0,0019	0,99
	88,50%	$y = 10,204e^{0,0017x}$	503	0,0019	0,99
Aquella	88,75%	$y = 10,204e^{0,0017x}$	1484	0,0019	0,99
	88,50%	$y = 10,204e^{0,0017x}$	1673	0,0019	0,99
Conquête	88,75%	$y = 10,204e^{0,0017x}$	721	0,0019	0,99
	88,50%	$y = 10,204e^{0,0017x}$	809	0,0017	0,99

Tableau 48 : Modèle exponentiel de l'accroissement des populations de formes cachées de *S. oryzae* dans trois variétés de blé tendre de dureté différente : comparaison des paramètres du taux intrinsèque d'accroissement naturel (r_m) [$dN/dt = N_t - N_0 (e^{r_m t})$]

2-2-3-Evolution de la flore fongique

2-2-3-1-Pourcentage de contamination fongique

Le pourcentage de grains contaminés par la mycoflore est corrélé négativement à la durée de stockage (variable 'GrCONT' ; $t = -6,26$; $P < 0,0001^{***}$) (Tabl. 44). C'est ainsi qu'il a diminué dans le temps d'une façon très hautement significative, ce qui est un résultat logique du fait que les espèces fongiques champêtres, très abondantes à la récolte, décroissent au cours du stockage à cause de l'activité de l'eau (A_w) devenue défavorable (Fig. 20). L'identification des genres des colonies, obtenues par la méthode Ulster (Fig. 23), nous a permis d'en établir une distribution comparative en relation avec les conditions de stockage (Tabl. 49).

Variété Blé	Caphorn		Apoche		Crousty	
	Teneur (nbx)	Infecté	Teneur (nbx)	Infecté	Teneur (nbx)	Infecté
Genre mycologique						
<i>Fusarium</i>	+++	+++	+	+	++	++
<i>Epiconium</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Aspergillus</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Penicillium</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Alternaria</i>	++	++	+	+	+	+
<i>Chrysosporium</i>	++	+	++	+	++	++
<i>Geniculifera</i>	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Sepedonium</i>	+	+	+	+	+	++
<i>Ulocladium</i>	++	+	++	+	++	+++
Misc	+	+	+	+	+	+
<i>Arthrotrys</i>	++	++	+	++	++	+
Autre	+	+	+	+	+	+

Tableau 49 : Distribution comparative de genres mycologiques isolés à partir d'échantillons de trois variétés de blé stocké pendant 160 j dans deux conditions d'HR et avec ou sans infestation par *S. oryzae*.

Parmi les 11 genres précisément identifiés, les plus fréquents sont *Fusarium*, *Geniculifera*, *Chrysosporium*, *Ulocladium*, *Arthrotrys* et *Alternaria*. La plupart de ces genres proviennent d'une contamination primaire au champ et ils appartiennent soit à la « mycoflore du champ » soit à la « mycoflore intermédiaire » en accord avec le concept classique des séries dynamiques des champignons des grains (Sinha, 1979 ; Pelhate, 1982).

A partir de la figure 25, la variété Caphorn montre qu'au début de notre expérimentation, les champignons dominants appartenait aux espèces dites du « champ » installées avant récolte : *Geniculifera*, *Fusarium*, *Epiconium*, *Chrysosporium*, *Sepedonium*. Au cours du stockage, cette flore du champ a régressé tandis que d'autres espèces, saprophytes intermédiaires, plus sensibles à une élévation de la teneur en eau des grains, se sont installées : *Alternaria*, *Ulocladium*, *Arthrotrys*. A partir du troisième prélèvement où la teneur en eau des grains a avoisiné 15%, se sont développés des genres dits de stockage : *Aspergillus*, *Penicillium*.

Les espèces répertoriées sont en majorité saprophytes et telluriques à l'exception de *Geniculifera* et *Arthrobotrys* qui sont nématophages et qui constituent des champignons auxiliaires de la lutte biologique contre les nématodes. C'est ainsi que *Geniculifera* piège dans une boucle les proies (nématodes ou larves d'insectes) qui se trouvent dans son biotope. Comme il ressort de la figure 22, la fréquence de ce champignon s'est réduite plus vite avec l'absence d'insecte, particulièrement avec cette variété pour laquelle l'équilibre entre HR de l'air et teneur en eau du grain s'établit à un niveau bas.

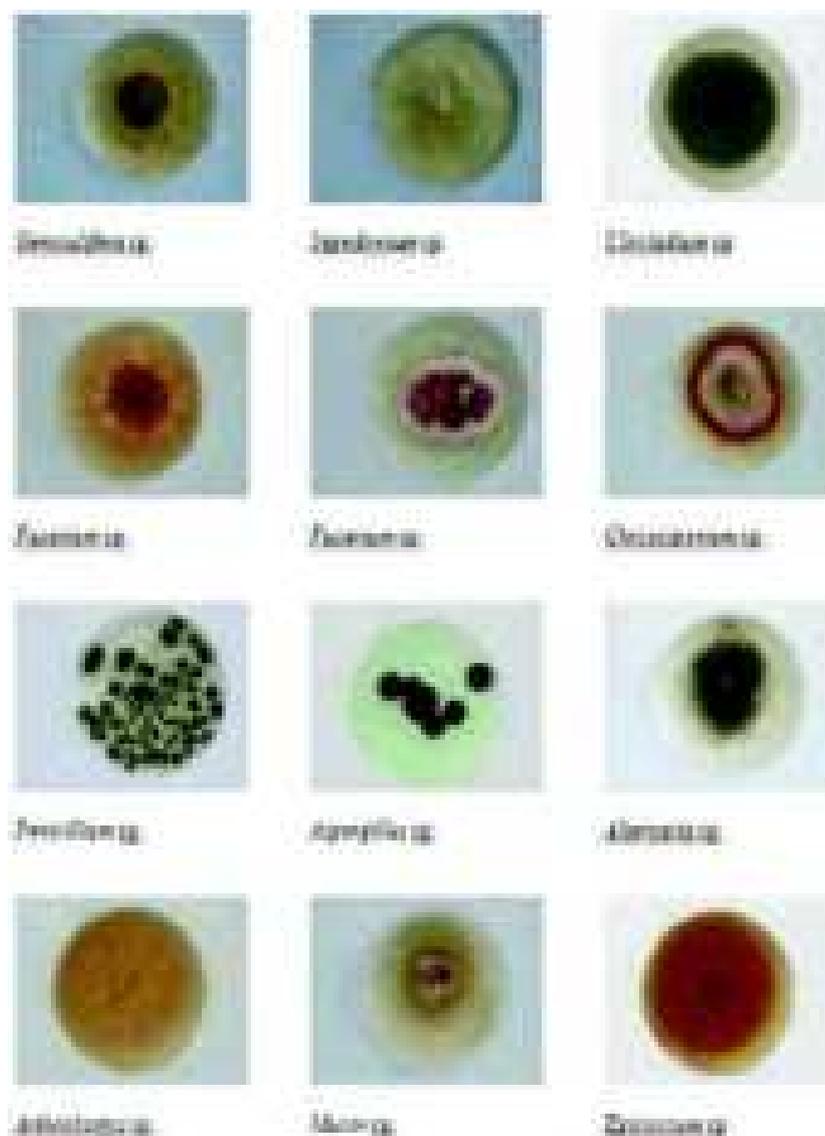


Figure 23 :Principaux genres fongiques isolés et identifiés au cours de l'expérimentation. Culture sur milieu gélosé PDA, à 25° C (original)

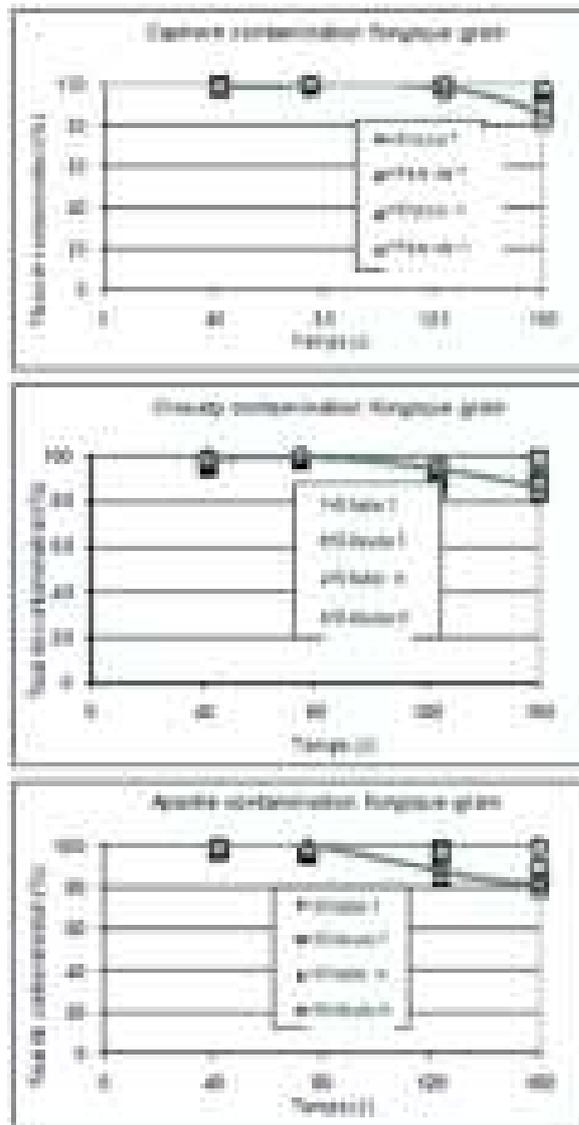


Figure 24 : Evolution du % de contamination fongique des grains de trois variétés de blé stocké sous une HR élevée ou basse, avec ou sans infestation par *S. oryzae* (T = Témoin, In = Infesté)

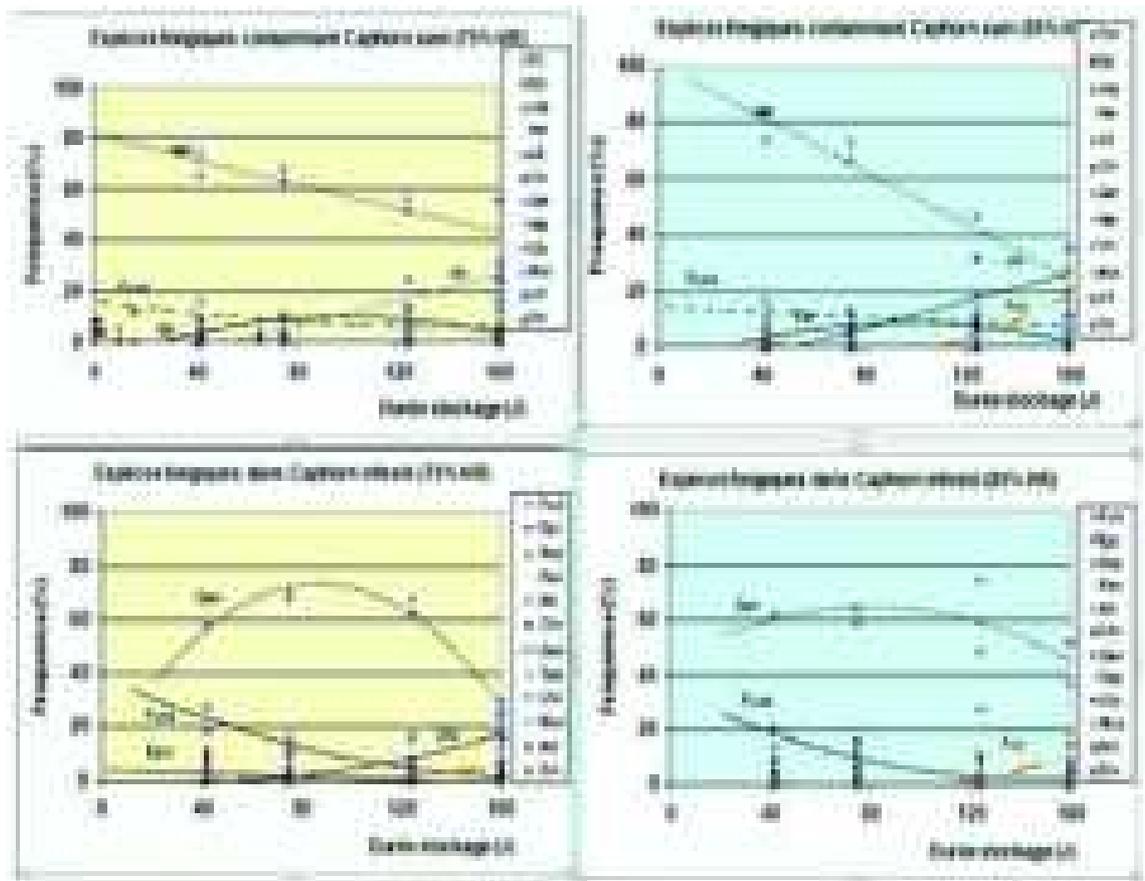


Figure 25 : Fréquence des différents genres de la mycoflore présents sur les grains de la variété Caphorn au cours du stockage pendant 23 semaines à 22-23°C, sous deux conditions d'humidité relative (HR) et avec ou sans infestation des grains par *S. oryzae*.

Légende : Fus = *Fusarium* sp. ; Epi = *Epicoccum* sp. ; Asp = *Aspergillus* sp. ; Pen = *Penicillium* sp. ; Alt = *Alternaria* sp. ; Chr = *Chrysosporium* sp. ; Gen = *Geniculifera* sp. ; Sep = *Sepedonium* sp. ; Ulo = *Ulocladium* sp. ; Muc = *Mucor* sp. ; Art = *Arthrobotrys* sp. ; Div = divers.

A titre de démonstration, les figures 26, 27 et 28 montrent, plus nettement, l'évolution distincte de ces trois séries de mycoflore des grains au cours du stockage :

- Le taux de contamination par les genres mycologiques champêtres a régulièrement diminué durant les 5 mois de stockage, jusqu'à s'annuler (Fig. 26).
- L'évolution de la mycoflore intermédiaire était conforme avec le concept classique des séries dynamiques des champignons des grains (Fig. 27).
- En accord avec la théorie, l'apparition des « champignons de stockage xérophiles » n'a pu survenir qu'après 4 mois de stockage (Fig. 28). *Aspergillus* et *Penicillium*, qui sont des saprophytes classiques, peuvent facilement évoluer au cours du stockage dans les grains attaqués par les insectes et / ou les grains humidifiés (Champion, 1997). Ils se transforment alors en parasites et contribuent à une biodégradation irréversible : A J₀ + 124 j, 85% HR, série infestée, notre expérimentation a montré l'abaissement de l'énergie germinative à 58,5%, 82% et 83,5% respectivement pour Apache, Caphorn et Crousty.

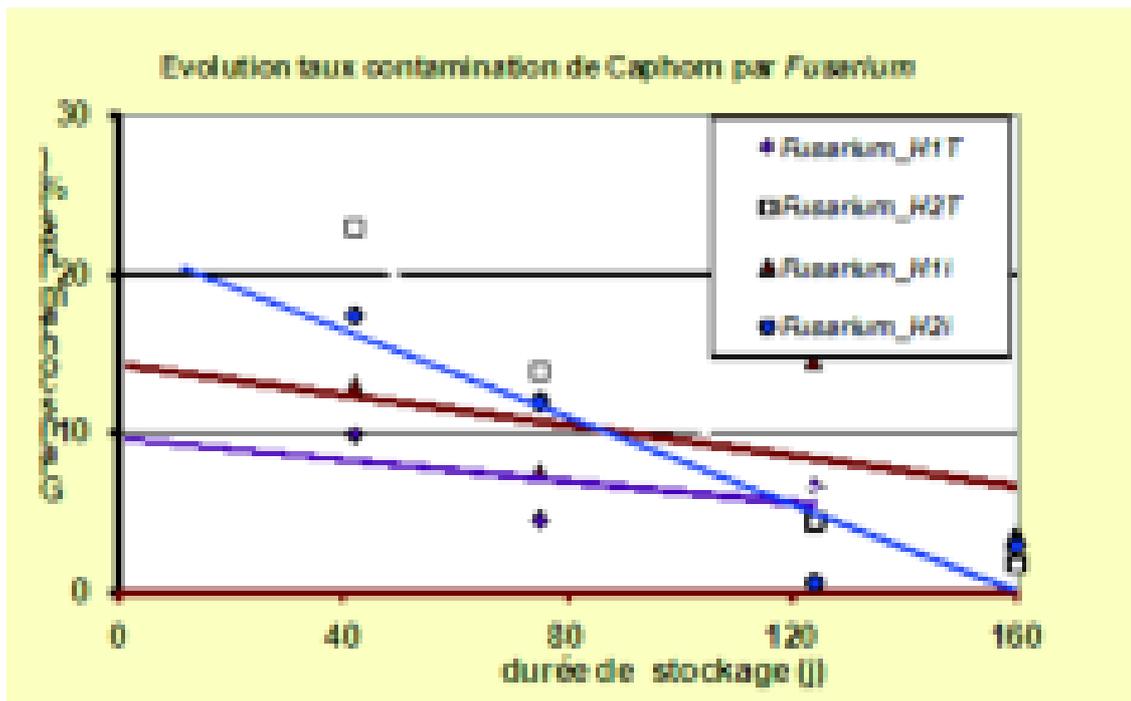


Figure 26 : Tendence générale de l'évolution du taux de contamination de la variété Caphorn par un champignon du champ du genre *Fusarium*.

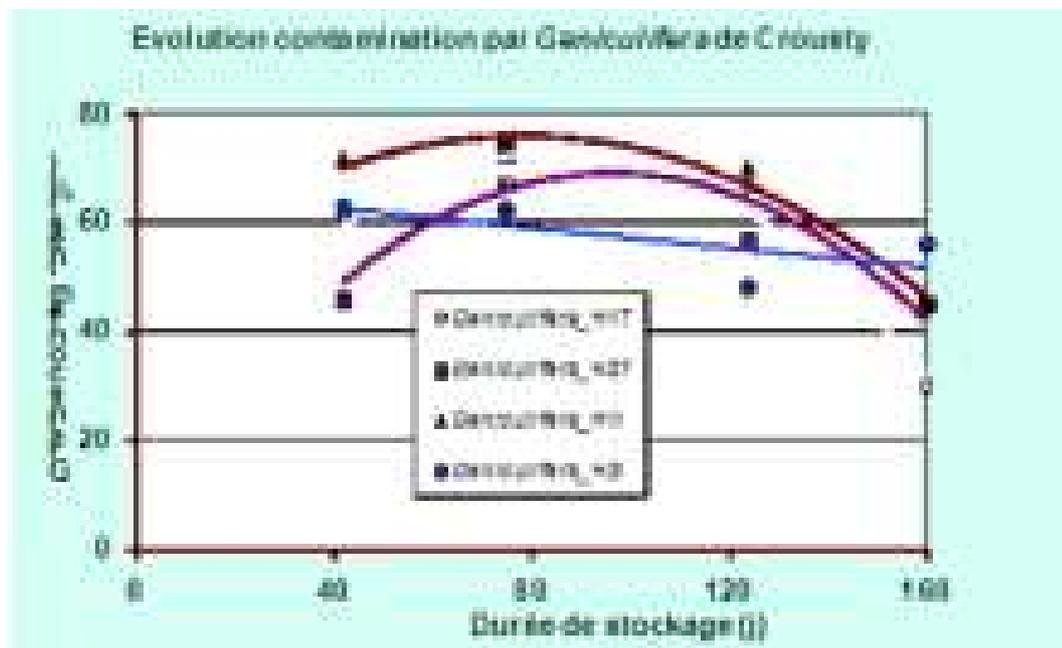


Figure 27 : Tendence générale de l'évolution du taux de contamination de la variété Crousty par un champignon semi-xérophile du genre *Geniculifera*.



Figure 28 : Tendence générale de l'évolution du taux de contamination de la variété Apache par un champignon xérophile (groupe des champignons de stockage) du genre *Penicillium*.

A partir des tableaux 44 et 45, le % de contamination fongique est ressorti en interaction (positive) avec le facteur variétal, plus précisément la dureté des grains ($Cc = 0,37$) et leur teneur en cellulose ($Cc = 0,38$), observations à mettre en relation avec la contamination initiale élevée de *Caphorn*. Les grains de cette variété ont présenté la dureté et la teneur en cellulose les plus élevées (Tabl. 42), conclusion corroborée par le tableau 49.

2-2-3-2-Nombre de propagules/g de grain

Le nombre de propagules par g de grain (variable 'MycoQ') n'a pas été influencé ni par la durée de stockage ($t = 1,363$; $P = 0,18$) ni par l'humidité relative ambiante ($t = 1,003$; $P = 0,322$) ni par l'état d'infestation ($t = 1,202$; $P = 0,236$) (Tabl. 44). Ce paramètre qui représente la contamination par la mycoflore totale, est resté stable au cours du stockage. Cependant, il est en corrélation positive à la limite de la signification avec la teneur en eau des grains ($Cc = 0,613$) et le nombre total d'insectes (insectes formes cachées et insectes adultes : $Cc = 0,743$) (et plus directement avec le nombre de formes cachées : $Cc = 0,773$) (Tabl. 45). Par opposition à la contamination fongique totale dont le taux diminue au cours du temps, à savoir le remplacement de la mycoflore champêtre par la mycoflore de stockage, la flore totale est apparue plus favorisée par la présence de grains infestés. L'origine de cette augmentation dans les grains infestés est probablement liée à l' a_w des grains dans lesquels se sont développés les insectes, qui devient plus élevée que celle des grains sains, restés intacts. De par l'absence d'une partie de l'enveloppe protectrice, les grains évidés, après émergence des imagos, ainsi que les grains cassés, s'humidifient plus rapidement et fortement et constituent un milieu favorable à la multiplication des microorganismes tel que rapporté par Multon (1982) et ITCF (2001).

Suite à la présente expérimentation et en accord avec les résultats de la première partie expérimentale, il ressort que la population d'insectes adultes n'a pas eu d'influence sur l'enrichissement du milieu en microorganismes bien que, selon certains auteurs, les

adultes, les larves et les nymphes soient porteurs de germes de champignons des stocks (Ragunathan *et al.*, 1974 ; Sharma *et al.*, 1979 ; Fleurat-Lessard, 1990). Les travaux de Hell *et al.* (2002) en Afrique ont montré que les insectes nuisibles des denrées stockées des genres *Cathartus* et *Sitophilus* jouent un rôle actif sur les niveaux de contamination des denrées infestées par les champignons toxigènes. Cependant, leurs résultats ne paraissent pouvoir s'appliquer qu'aux conditions de stockage en climat tropical, favorables à une très forte multiplication des insectes (et concernent plutôt le maïs), ce qui est très éloigné des conditions de conservation du blé en climat tempéré.

2-2-4-Capacité germinative.

Comme le montre le tableau 44, la capacité germinative semble dépendre de la durée de stockage de façon très hautement significative ($t = -4,125$; $P = 0,000^{***}$). Quelles que soient les conditions de stockage, la capacité germinative s'affaiblit dans le temps, ce qui rejoint les modèles de germination pour l'orge de brasserie d'Ellis et Roberts (1980_{a, b}), Woods *et al.* (1994) et de Jacobsen *et al.* (2005). Cependant, l'état d'infestation (c'est-à-dire la présence d'insectes vs. l'absence) ($t = -2,86$; $P = 0,007^{**}$) a influé sur ce critère négativement et significativement ce qui va dans le même sens que les résultats publiés par de très nombreux auteurs (Howe, 1973 ; Khare *et al.*, 1974 ; Lustig *et al.*, 1977 ; Sharma *et al.*, 1979 ; Sinha et Muir, 1983 ; Fleurat-Lessard et Poisson, 1984 ; Imura et Sinha, 1984 ; Sinha, 1984 ; Ramzan et Chahal, 1985 ; Sittisuanget Imura (1987) ; Démianyk et Sinha, 1988 ; Kapu *et al.* (1989) ; White et Jayas, 1991 ; Fleurat-Lessard *et al.*, 2005). Ainsi, suite à l'endommagement de l'embryon par les insectes, les grains infestés ont montré une perte de viabilité qui s'est accentuée dans le temps. Dans le cas des lots de blés infestés, aux deux HR étudiées, dans la première phase de la conservation, on a assisté à une légère élévation de la faculté germinative pouvant être due, d'une part, à une faible humidification du milieu, favorable à la germination et à la levée de dormance secondaire et, d'autre part, à une densité d'infestation faible (Fig. 29). A partir du contrôle à 75 j, l'humidification des grains et l'infestation s'accroissant, la capacité germinative a régressé, d'autant plus que les grains étaient très infestés, en particulier pour la conservation sous une HR de 85 %. Il a été mis en évidence un effet significatif, à un degré moindre, du facteur 'variété' sur la faculté germinative ($t = -2,161$; $P = 0,045^*$), le coefficient de corrélation « 'PS'-Cap. Germinative », positif, étant égal à 0,90 (Tabl. 45). Ces deux critères sont donc fortement liés et seront d'autant plus faibles que l'état sanitaire des grains sera défectueux. Ainsi la variété Apache, qui a la masse à l'hL la plus élevée, est celle dont la capacité germinative a été le moins dégradée au cours de la phase initiale de l'expérimentation, lorsque les densités d'insectes étaient encore faibles. Toutefois, cette variété s'est avérée finalement plus sensible à la détérioration de la viabilité du grain en fin de période de conservation, probablement à cause de sa capacité particulièrement élevée d'absorption de l'humidité, un des facteurs clés de la dynamique de multiplication de *S. oryzae* ; cette aptitude est un facteur de sensibilité intrinsèque à la variété, indépendant de la variable de la masse à l'hL.

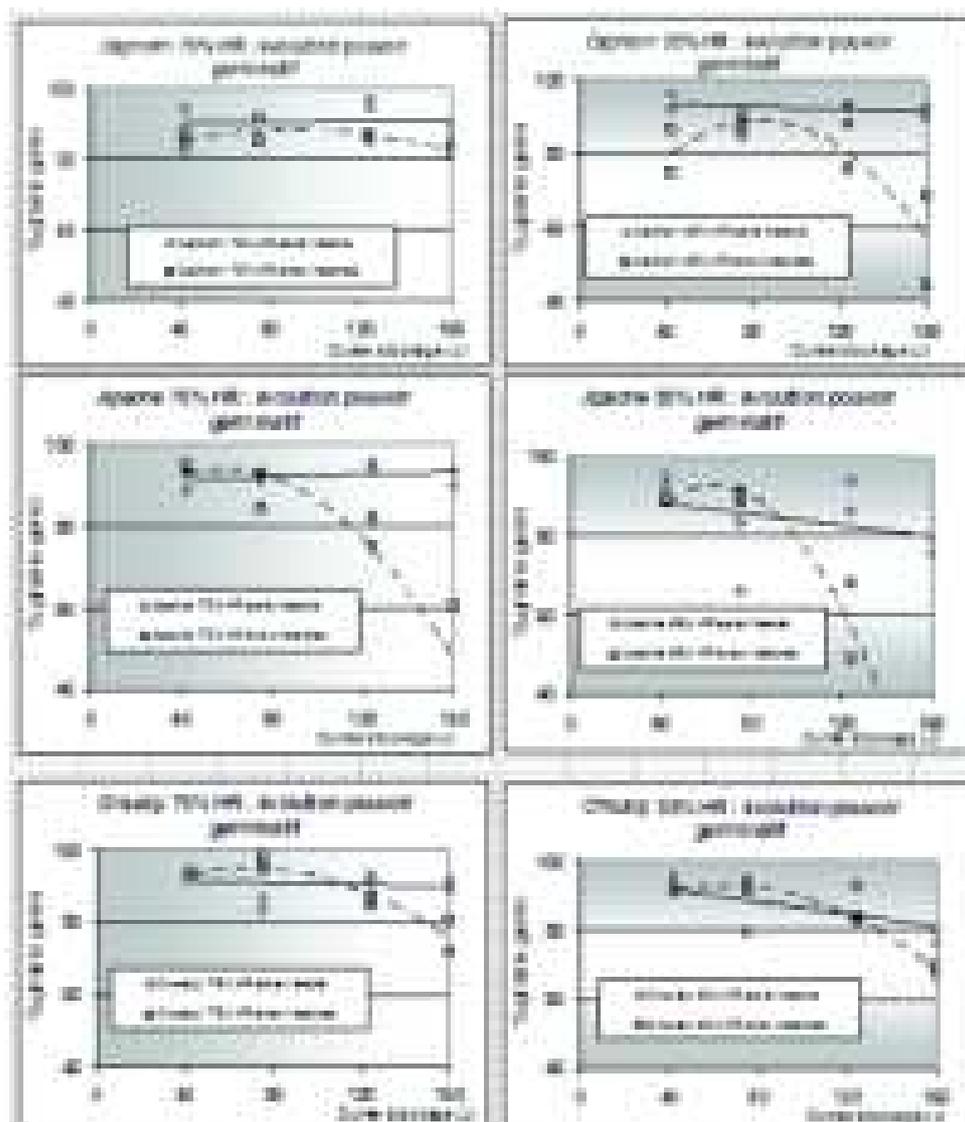


Figure 29 : Evolution de la capacité germinative des trois variétés de blé stockées à 22-23°C pendant 160 j à deux HR différentes et avec ou sans infestation par *S. oryzae*.

2-2-5-Acidité grasse (AG)

L'acidité grasse est restée stable au cours des deux premiers mois de conservation dans les traitements témoins et a augmenté d'une façon insignifiante dans la série infestée. Une élévation plus significative a été constatée au contrôle à 124 j de stockage dans tous les traitements plus particulièrement dans les lots conservés à l'HR la plus élevée, série infestée (0,046 à 0,053 g H₂SO₄/ MS) (Fig. 30). A ce troisième prélèvement, le nombre total d'insectes (adultes libres et formes cachées) était déjà très important à HR 75% avec 977, 2382 et 1442 individus pour Caphorn, Apache et Crousty, respectivement. Au terme des 160 j de stockage, ce n'est que dans les lots avec pullulation d'insectes et en particulier pour *Apache*, que l'acidité mesurée a atteint une teneur élevée. Elle est demeurée, cependant, en deçà de la limite légale fixée à 0,06 g (Cahagnier, 1988) (excepté Apache, 75% HR et plus fortement à 85% HR, séries infestées, où la majorité des grains, ou la totalité, ont subi ou subissaient la forme cachée). Ceci montre que ce critère ne permet

pas de prévenir une infestation mais il reflète des conditions de détérioration très avancées et ne peut donc être utilisé dans la protection antiparasitaire intégrée.

Nous avons pu montrer que le critère 'Acidité Grasse' est fortement corrélé à la masse à l'hL et à la capacité germinative ($C_c = -0,91$ et $-0,90$ respectivement) et qu'il dépendait du nombre d'insectes, formes cachées, de la charge microbienne des grains et de leur teneur en eau ($C_c = 0,92$; $0,91$ et $0,82$ respectivement) (Tabl. 45). Ainsi, dans un lot de blé sain, l'acidité grasse sera basse par opposition au 'PS' et à la capacité germinative qui seront élevés. Suite à l'élévation de la teneur en eau des grains favorisant d'une part l'infestation et d'autre part l'infection par la flore totale, un échauffement des grains a eu lieu, les rendant plus propices aux réactions chimiques et enzymatiques, telles que l'hydrolyse des lipides d'où acidification du milieu ; les risques d'altération d'un lot de blé sont d'autant plus élevés que la teneur en eau et la température des grains s'élèvent (Jemmali, 1971, Multon, 1982).

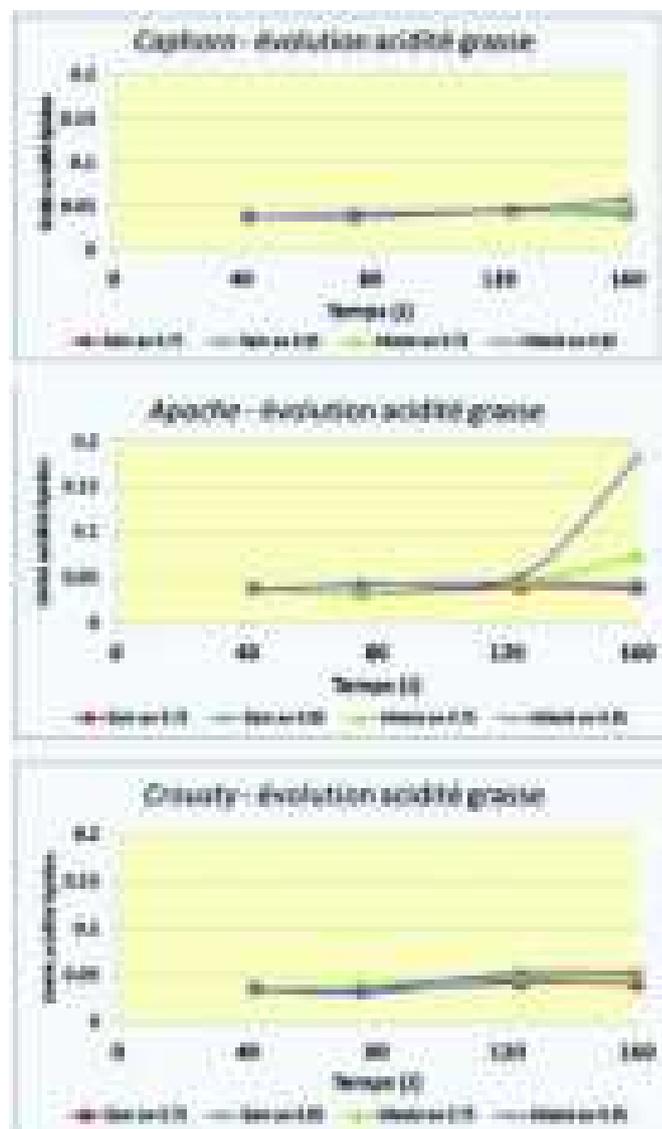


Figure 30 Evolution de l'acidité grasse de farines complètes issues de trois variétés de blé stocké pendant 160 j à deux HR différentes, avec et sans infestation par *S. oryzae*

2-2-6-Acide urique (AU)

Après avoir vérifié la signification positive du dosage de l'acide urique à 520 nm (Fig. 31), l'analyse de nos résultats a montré que la production d'acide urique ressort dans les traitements analysés après infestation (Tabl. 50, Fig. 32). Elle augmente dans le temps ($C_c = 0,30$) d'autant plus que l'infestation « formes cachées » s'intensifie ($C_c = 0,96$) et que la teneur en eau des grains s'élève ($C_c = 0,72$) (Tabl. 45) : les stades larvaires du charançon, logés dans les grains, s'y développent en accumulant excréments et différentes substances du métabolisme. La production d'acide urique est donc proportionnelle à l'effectif de la population d'insectes « formes cachées » et à la longueur du cycle de développement ou du séjour dans le milieu alimentaire. Les insectes adultes, qui constituent la forme libre, ont eu un effet insignifiant sur la production d'acide urique ($C_c = 0,04$). Celle-ci s'accompagne d'une élévation de l'acidité grasse ($C_c = 0,91$) et du nombre de propagules par gramme de grain ($C_c = 0,81$) ainsi que d'une réduction de la capacité germinative ($C_c = -0,88$) et de la masse à l'hectolitre ($C_c = -0,64$). L'infestation par les insectes, qui est à l'origine de l'altération des grains, va donc, outre la production d'acide urique, favoriser l'acidification des grains et leur humidification, et par là même, la contamination microbiologique. Ceci va donc entraîner la perte de la viabilité des grains et de leur qualité industrielle et sanitaire. D'après FAO (1984), la teneur maximale permise par la loi interdisant la falsification des produits alimentaires en Inde est de 10 mg pour cent grammes de grains, teneur que nous avons obtenue dès le troisième prélèvement où le niveau élevé d'infestation était de l'ordre ou dépassait 1000 individus par kg suivant les variétés et les conditions ambiantes. Cette analyse, ou du moins la méthode que nous avons utilisée, n'a pas permis de déceler l'infestation à son faible niveau (Fig. 32). Son utilisation nécessite une révision de la méthode, pour une détection plus fine et précoce, qui permettrait de mettre en évidence une quelconque infestation présente ou passée.

Grain	HR	HR	HR	HR	HR	HR	HR
Blé	160 j	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
	160 j	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
Blé	160 j	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
	160 j	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%
		100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 50 : Evolution de la teneur en ergostérol et en acide urique des grains de trois variétés de blé stocké dans deux HR différentes pendant 160 j, avec ou sans infestation par *S. oryzae* en relation avec l'effectif d'insectes / kg de grain.

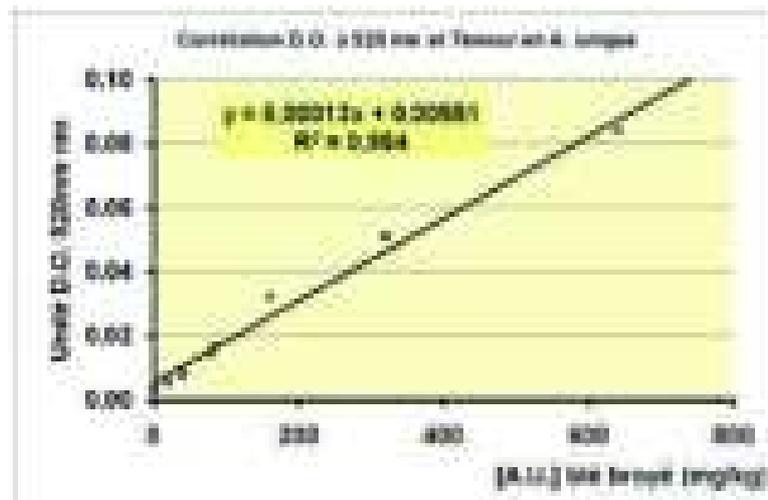


Figure 31 : Fonction de calcul de la teneur en a.u. : $[a.u.] = (DO - 0,00551) / 0,00013$

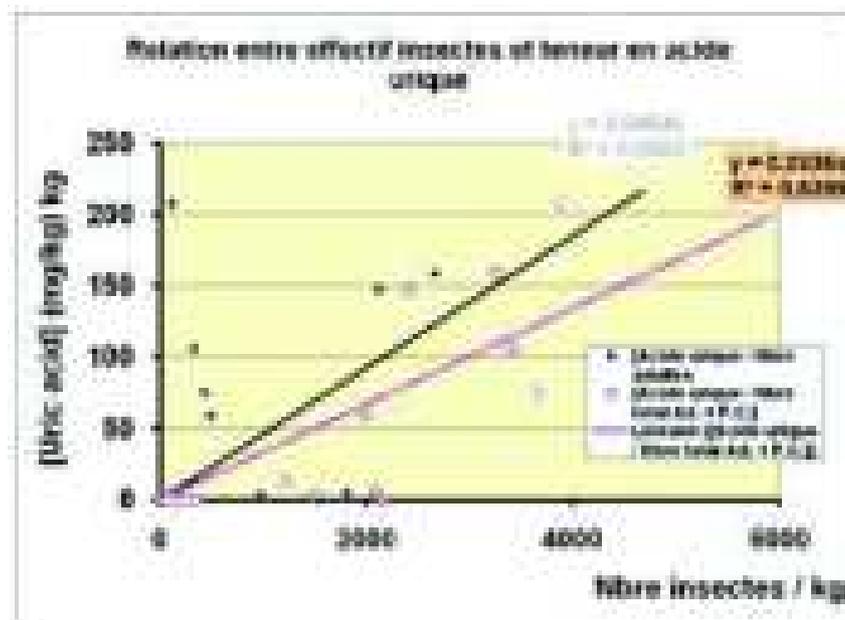


Figure 32 : Relation entre l'effectif d'insectes par kg de grain (adultes ou totalité des stades = adultes + formes cachées) et la teneur en acide urique

2-2-7-Ergostérol

Pour l'ensemble des traitements, et dès le premier prélèvement, il ressort que la valeur de l'ergostérol mesurée s'est située au seuil d'altération (Tabl. 50) ; selon Cahagnier (1988), pour le blé, ce seuil est de l'ordre de 10 à 12 µg/g pour le blé et de 5 à 8 µg pour le maïs. Les valeurs des critères acidité grasse et nombre de propagules par gramme de grain doivent parallèlement évaluer ou dépasser les seuils fixés (0,06 g H₂SO₄% MS pour l'acidité grasse et 10⁵ pour la deuxième variable). Ceci confirme que, dès la réception, les grains présentaient un niveau de contamination assez élevé, par rapport aux conditions particulièrement pluvieuses de l'année de culture des lots utilisés.

La méthode que nous avons appliquée, inspirée de la norme AFNOR V01812 et revue pour une utilisation courante par l'Unité MycSA de l'INRA de Bordeaux, ne nous a pas donné des résultats assez précis (Tabl. 50). Ceci peut être dû au fait que la teneur en ergostérol des grains de nos traitements était faible par comparaison à celle, plus élevée, des produits couramment analysés dans cette unité. Cette analyse, très intéressante pour la détermination de l'état de contamination par la flore fongique des blés importés mais également locaux, nécessite la révision de la méthode pour la rendre plus sensible et précise.

2-3-Comparaison de la qualité technologique initiale et finale

2-3-1-Caractéristiques meunières

La variable *PMG*, qui est un caractère associé à la variété, semble être liée à la dureté des grains, à leur densité et à leur grosseur ($Cc = -0,74$) (Tabl. 45). Il a été observé une influence non significative pour l'état d'infestation et l'humidité relative ambiante. En effet, aucun effet significatif de l'action des insectes n'est détectable sur la variable *PMG*, même en cas d'infestation par les insectes à une densité élevée, sans toutefois dépasser le maximum atteignable en pratique, ce qui a également été montré par Fleurat-Lessard et Poisson (1984).

La masse à l'hectolitre ou '*PS*' a diminué de façon très hautement significative au cours du stockage ($t = -4,728$; $P < 0,0001^{***}$), en parallèle avec la variation de la teneur en eau ($t = -8,172$; $P < 0,0001^{***}$) et avec la densité d'infestation, formes cachées ($t = -3,044$; $P = 0,004^{**}$) (Tabl. 44). Pour les trois variétés, la masse à l'hectolitre a diminué au fur et à mesure que la durée de stockage s'allongeait ($Cc = -0,54$), que la teneur en eau des grains

augmentait ($Cc = -0,85$) et que l'infestation s'intensifiait ($Cc \text{ Insect_Tot} = -0,89$) (Tableau 45). L'analyse statistique a montré que la variable « nombre d'insectes, formes cachées » était responsable de la réduction du « PS » ($Cc = -0,87$) contrairement au nombre d'insectes adultes qui a présenté un effet insignifiant sur ce paramètre ($Cc = -0,25$). Parallèlement à la réduction du « PS », la capacité germinative s'est affaiblie ($Cc = 0,90$) alors que l'acidité grasse s'est renforcée ($Cc = -0,91$) et la teneur en acide urique a augmenté ($Cc = -0,84$). Les formes cachées, larvaires principalement, nécessitant un prélèvement d'amande conséquent pour leur développement, ont occasionné une diminution de la masse des grains infestés, d'où réduction du « PS » d'autant plus importante que l'infestation est forte.

L'augmentation de la densité de population des insectes au cours du stockage a entraîné une réduction du taux d'extraction des farines. Cette réduction du rendement en farine, qui a pu être mise en évidence dans des situations extrêmes de fin de période de stockage (après plus de 5 mois de conservation à température favorable au développement des insectes) avait déjà été observée par plusieurs auteurs au cours des dernières décennies (Imura et Sinha, 1984 ; Ramzanet Chahal, 1985 ; Amos *et al.*, 1986 ; Fourar, 1987, 1994 ; Khare *et al.*, 1987 ; Sanchez-Martinez *et al.*, 1997).

2-3-2-Caractéristiques boulangères.

Comme dans la première partie expérimentale, les analyses statistiques ont montré que le temps de chute (variable '*IC*') n'a été influencé ni par la durée de stockage, ni par l'humidité relative ambiante, pas plus que par l'infestation des grains (Tabl. 44).

La détermination des paramètres alvéographiques a fait ressortir que le stockage de grains sains à l'HR de 75 %, malgré une légère réduction du gonflement, n'a pas modifié significativement la force boulangère des farines extraites des variétés expérimentées qui ont conservé une qualité convenable pour leur utilisation principale dans les industries céréalières (Tabl. 51). Par contre, pour les farines extraites des lots de blé de la série infestée, il a été observé une réduction nette du W et du G en fin de période de conservation (après 160 j), entraînant un déséquilibre des paramètres rhéologiques de la pâte. Dans le cas de la variété Caphorn (à réception, P/L= 1,39 ; fin expérimentation, P/L ≈ 5 dans les 2 conditions HR) qui avait un gonflement de départ à la limite de l'acceptabilité (G = 18), cette détérioration de l'aptitude à la panification, amplifiée par la pullulation des insectes, était très avancée en fin d'expérimentation puisque la farine issue est devenue impropre à l'utilisation industrielle (Ie = 0%). Pour les lots de blé conservés à l'humidité relative de 85 %, en l'absence d'infestation, la période de 5 mois de conservation a eu pour conséquence un affaiblissement du gonflement des farines extraites, d'intensité variable selon les variétés. Toutefois, ces lots sont également restés utilisables pour l'industrie. En revanche, les farines extraites des lots infestés accusent en fin de période de stockage (avec dans la majorité des cas, une pullulation des insectes) une chute très nette et forte de la force boulangère et du gonflement, entraînant l'inaptitude de ces blés à la transformation alimentaire. La réduction du gonflement a été d'autant plus néfaste que la variété de blé est d'un phénotype à faible extensibilité comme Caphorn.

Variétés	Avant stockage						Après 160 j de stockage								
	HR 75% ss ma.			HR 75% av ma.			HR 85% ss ma.			HR 85% av ma.					
	W	G	P/L	W	G	P/L	W	G	P/L	W	G	P/L			
Caphorn	345	18,1	1,39	275	17,7	1,39	199	13	0,27	202	10,1	1,39	169	12	4,87
Apache	289	24,5	0,81	209	23,8	0,82	158	10,1	1,41	169	10,4	0,72	*	*	*
Crousty	199	27,4	0,28	120	20,6	0,44	120	16,7	0,28	128	20,1	0,32	189	14,5	1,34

Tableau 51 : Evolution des paramètres alvéographiques des farines extraites des trois variétés de blé avant et après stockage pendant 160 j à deux HR différentes et avec ou sans infestation par *S. oryzae*

* Incalculable

2-4-Pertes pondérales

La figure 33 montre l'effet très net du facteur variétal sur les pertes exprimées en pourcentage de disparition de matière sèche en cours de stockage, ce qui confirme des résultats antérieurs (Fourar, 1994). Cependant, la présente étude a révélé une sensibilité particulière de la variété Apache à l'attaque des charançons qui s'est traduite par des pertes, au bout de 160 j de stockage, de 6 et 12% pour les HR de 75% et 85% respectivement. Par contre, les deux autres variétés, Caphorn et Crousty, ont enregistré, pour la même période, une perte inférieure ou égale à 1% (Fig. 33). Bien qu'elle ait hébergé une densité d'adultes de *S.oryzae* comparable à celle de la variété Apache à 75 % HR, il a été clairement mis en évidence que la variété Crousty, aux grains les plus gros et à HR 85%, a enregistré une perte de matière sèche de seulement 0,041% contre 6,26% pour Apache.

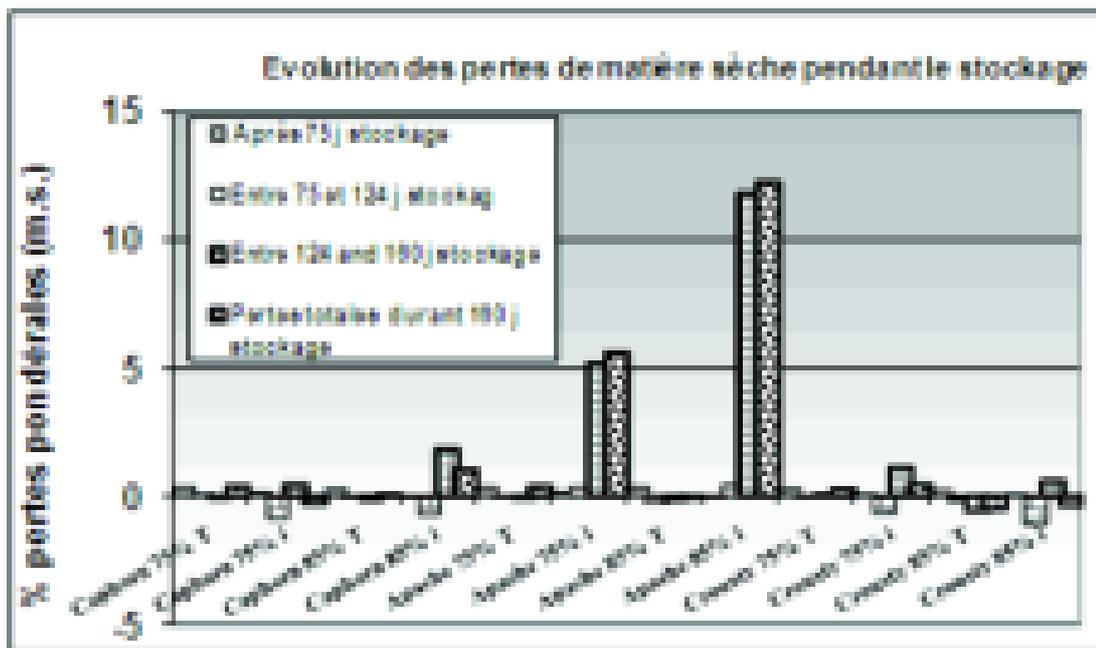


Figure 33 : Evolution des pertes de matière sèche des lots des 3 variétés de blé au cours du stockage à température constante (22-23°C) pendant 160 j, à deux HR différentes et avec une infestation par *S. oryzae* (référence modalité « i ») ou non (référence modalité « T »).

Parmi les trois variétés soumises à l'expérimentation, Crousty étant la plus tendre, le facteur dureté ne peut être associé à cette sensibilité de la variété Apache aux dégâts commis par les charançons. Cependant, ce facteur est considéré par de nombreux chercheurs comme étant à la base de la résistance variétale aux attaques d'insectes (Russel, 1962 ; Dobie, 1974 ; Juliano, 1981 ; Horber, 1983 ; Fourar, 1994). Dans la première partie de cette présente étude, nous avons pu mettre en évidence que la dureté des grains contribue fortement à la résistance des grains à l'attaque du déprédateur le plus nuisible aux céréales, *S. oryzae*, lorsque les conditions d'humidité relative sont basses ($HR \leq 65\%$), en particulier pour le blé dur. Dans ces conditions, cette espèce a opposé une résistance « totale » à la multiplication de ce ravageur.

La deuxième partie de cette expérimentation a montré que cette contradiction peut être levée par l'analyse en régression multiple des facteurs explicatifs pris en considération dans les modèles de prédiction de chaque variable dépendante suivie sur la durée totale de la période d'expérimentation (Tabl. 44). Les valeurs présentées montrent que la variation de la teneur en eau des grains dans les différentes conditions de stockage des trois variétés de blé a pu être modélisée par quatre variables explicatives : durée de stockage, variété (teneur en alkyl-résorcinoles), niveau d'HR et état d'infestation ; Les deux premières variables présentent l'impact le plus fort sur la teneur en eau des grains ; la variable 'dureté' n'a pas montré d'influence significative sur le modèle de variation de la densité d'insectes. Ainsi, il a pu être démontré, dans les conditions expérimentales de ce présent essai ($HR \geq 75\%$), que le facteur 'dureté' du grain n'influait pas significativement la sensibilité des variétés de blé aux pullulations d'insectes ravageurs primaires des stocks (de type charançon). Cependant, cette sensibilité était plutôt à associer à la capacité plus ou moins forte d'hydratation du grain en échange avec l'humidité relative de l'air ambiant, facteur difficile à maîtriser dans les installations de stockage en cellules ouvertes.

Un des résultats originaux de la présente étude a été de montrer que la plus grande sensibilité de la variété Apache à la multiplication et aux dégâts de *S. oryzae* est prioritairement associée à la propriété physico-chimique intrinsèque des grains de cette variété de s'équilibrer à une teneur en eau plus élevée que celle des deux autres variétés, pour une même humidité relative dans l'enceinte de stockage. L'hypothèse avancée du rôle joué par les alkyl-résorcinol, lipides phénoliques hydrophobes, concentrés dans les tissus du péricarpe du grain, et agissant sur les propriétés des membranes, en venant probablement interférer avec le processus d'adsorption d'humidité par le grain, reste à approfondir. La variété Apache présente la plus forte teneur (0,55 mg/g ms) et la variété Crousty la plus faible (0,4 mg/g ms)].

2-5-Interactions entre les variables étudiées

Pour mettre en évidence les modèles de cause à effet élaborés entre variables dépendantes et explicatives, les interactions multiples entre l'ensemble des variables étudiées ont été approfondies par deux analyses en composantes principales (ACP).

2-5-1-Une représentation plus complète de l'évolution des caractéristiques qualitatives des trois variétés au cours du stockage

A été présentée (Fig. 34). Celle-ci, représentant le cercle des corrélations entre l'ensemble des variables quantitatives (dépendantes et explicatives) de l'étude, a fait ressortir une première composante (F1) qui contient plus de 35% de la variance totale. Par la proximité des facteurs de détérioration qualitative avec une des extrémités de l'axe F1, il est mis en évidence un impact fort de ces « forces détérioratives » (variables : *Durée*, H_2O , *InsFC*, *MycoQ*, *InsAD*) sur les indices de qualité sanitaire positionnés près de l'autre extrémité (capacité germinative : *CapGE* et masse à l'hectolitre : *PS*). Ainsi, il est confirmé par l'ACP que les variables responsables de la détérioration au cours de la conservation sont négativement corrélées (à un niveau hautement significatif) à la masse à l'hL (*PS*) et à la capacité germinative (*CapGE*). Ces deux dernières variables, dépendantes, sont fortement corrélées entre elles : tous les facteurs qui entraînent une diminution du *PS* sont associés à une dégradation parallèle de la capacité germinative. Cette dernière, bénéficiant d'une excellente prédiction par le modèle issu de la régression multiple (Tabl. 44), a été choisie en priorité pour élaborer un indice de prévision de la sensibilité des grains à la détérioration qualitative pendant le stockage.

Les variables H_2O , *InsFC* et *MycoQ* sont corrélées positivement à la durée de stockage (*Durée*), ce qui indique que, d'une façon générale, la prolongation du stockage entraîne une humidification progressive des grains, une augmentation de la densité de formes cachées (dans le cas des traitements avec infestation) et un enrichissement de la flore de stockage (évolution sensible seulement au cours du dernier mois de stockage). A l'opposé, le pourcentage de grains contaminés par la flore fongique (*GrainCO*) est corrélé négativement avec la durée de stockage ce qui peut s'expliquer par une perte progressive de viabilité des germes de la mycoflore du champ et par la croissance, plus lente de la mycoflore intermédiaire, puis de stockage. La composante 2 qui représente près de 27 % de la variance totale, se construit à partir des variables de structure physico-chimiques des trois variétés étudiées : dureté, composition biochimique ainsi que d'une variable de qualité technologique, l'indice de chute de Hagberg. Cette composante a montré que la dureté des variétés choisies (variable *DUROM*) est corrélée positivement avec la teneur en cellulose et le temps de chute (*HAGB*), mais la corrélation est négative pour la teneur en protéines, en matières grasses et la masse de 1000 grains (*PMG*), en relation avec les

caractéristiques physico chimiques et technologiques des variétés de blé tendre soumises à l'expérimentation.

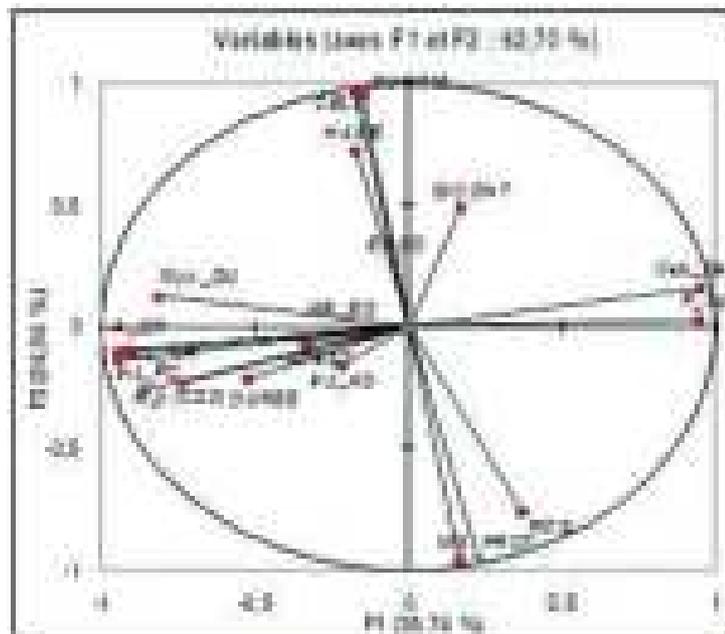


Figure 34 : Analyse en Composantes Principales : cercle des corrélations entre l'ensemble des variables quantitatives (dépendantes et explicatives) de l'étude sur l'évolution des caractéristiques qualitatives (A_GR, Myc_QU, Ins_AD, Ins_FC, Cap_Ge, P_Sp, PMG, PROT, CELL, GrCONT, ERGO, AC_UR, H2O, HAGB) de trois variétés de blé stockées pendant 160 j à 22-23°C (DUREE) à deux humidités relatives d'équilibre (HR_EQ) et avec ou sans infestation par les insectes (INFEST).

Le nombre d'insectes adultes/kg, pas plus que le PMG, n'a été montré corrélé significativement avec aucune autre variable dépendante. C'est essentiellement la population d'insectes sous forme cachée qui joue un rôle décisif dans la dégradation de certains critères de la qualité, alors que la variation du PMG dépend essentiellement du facteur variétal.

2.5.2. Une analyse multivariable des changements dans le temps des communautés de champignons dans les variétés de blé tendre soumises à l'expérimentation a été effectuée.

Une régression linéaire multiple a été calculée pour le modèle de prédiction de chaque variable dépendante (incluant chaque fréquence de genre mycologique) comme une fonction polynomiale des variables explicatives : dureté des grains, niveau d'humidité relative, présence ou absence d'insectes, effet spécifique variétal. L'analyse de la régression linéaire multiple a montré que les variables dépendantes pouvaient être corrélées avec la série de variables explicatives, à l'exception du nombre de germes par gramme de grain (Fungi_Q) (Tabl. 52).

Ainsi, les régressions polynomiales les plus significatives ont concerné les genres mycologiques suivants : *Ulocladium*, *Chrysosporium*, *Arthrotrrys*, *Fusarium*, *Geniculifera* et *Aspergillus*. Cependant, les variables explicatives n'ont pas pu expliquer le même taux de variance pour chaque variable dépendante. Ainsi, la durée de stockage (Durée) s'est montrée une composante très hautement significative du modèle de prédiction de toutes

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

les variables, à l'exception de Fungi_Q, alors que l'état d'infestation s'est révélé fortement et négativement corrélé à la capacité germinative et sans relation avec la variance des genres mycologiques. La contribution de la variété Apache à la variance de la teneur en eau a été significative par comparaison aux deux autres variétés, ce que nous avons souligné et montré précédemment. Pour la contribution des variétés à la variance des genres mycologiques, il a été observé deux corrélations négatives entre la variété Apache et les genres *Fusarium* et *Chrysosporium* et une corrélation positive avec le genre *Geniculifera*. La variété Caphorn a présenté une corrélation positive significative avec seulement le genre *Mucor* (Tabl. 53).

Variable	Unité	Corrélation	Signif.	Variable	Unité	Corrélation	Signif.
Teneur en eau	%	0,15	0,001	HR	°C	-0,25	0,001
Teneur en protéines	%	0,05	0,001	Infest	mg/kg	-0,30	0,001
Teneur en lipides	%	0,02	0,001	Var_Apache		0,10	0,001
Teneur en glucides	%	0,03	0,001	Var_Caphorn		0,05	0,001
Teneur en fibres	%	0,01	0,001	Fungi_Q		-0,15	0,001
Teneur en cendres	%	0,02	0,001	Fusarium		-0,10	0,001
Teneur en minéraux	%	0,01	0,001	Chrysosporium		-0,08	0,001
Teneur en vitamines	%	0,01	0,001	Geniculifera		0,05	0,001
Teneur en acides gras	%	0,01	0,001	Equilicium		-0,05	0,001
Teneur en acides aminés	%	0,01	0,001	Ecdysium		0,05	0,001
Teneur en vitamines B	%	0,01	0,001	Mucor		0,05	0,001
Teneur en vitamines C	%	0,01	0,001	Aspergillus		0,01	0,001
Teneur en vitamines E	%	0,01	0,001	Penicillium		0,01	0,001
Teneur en vitamines K	%	0,01	0,001	Cladobotryum		0,01	0,001
Teneur en vitamines P	%	0,01	0,001				

Tableau 52 : Paramètres descriptifs du modèle de régression multiple régressant les variables dépendantes en tant que fonction polynomiale des variables explicatives : dureté des grains, HR d'équilibre, état d'infestation et effet spécifique variétal.

Genre mycologique	Durée	Infest	Var_Apache	Var_Caphorn
Caps. germin.	négative	négative		
Fungi_Q	NS			
Teneur en eau	négative			positive
Teneur en protéines	positive		positive	
Fusarium	négative		négative	
Aspergillus	positive			
Penicillium	positive			
Chrysosporium	négative		négative	
Geniculifera	négative		positive	
Equilicium	négative			
Ecdysium	positive			
Mucor	positive			positive
Aspergillus	positive			

Tableau 53 : Direction des corrélations significatives entre la variance de facteurs contrôlés et de communautés de genres mycologiques enregistrées sur 3 variétés de blé stocké pendant 160 j dans des conditions environnementales saines et critiques (HR, état d'infestation et dureté des grains selon les variétés de blé choisies)

La représentation graphique du niveau de corrélation entre les variables par le diagramme circulaire de l'analyse en composantes principales (ACP) a permis de mettre en évidence les interactions les plus nettes entre les variables significativement impliquées dans le processus de détérioration durant la stockage en conditions critiques (Fig. 35). Il a été observé que l'axe de la première composante (F1) a contribué à plus de 38% de la variation totale. Les genres mycologiques ont été distribués en deux groupes distincts à chaque extrémité de cette première composante ; le premier groupe comprend les genres négativement corrélés avec les variables « Durée de stockage » et « Teneur en eau », ce qui signifie que ces genres de champignons régressent dans le temps et dans les grains à teneur en eau basse (Tabl. 53). Ainsi, ces genres mycologiques peuvent être clairement classés parmi les « champignons hygrophiles de champ » tels que *Fusarium*, *Sepedonium*, *Chrysosporium* et *Geniculifera*. A l'extrémité opposée de l'axe 1, le second groupe des genres mycologiques était corrélé à la durée de stockage en dépendance significative avec la variation de la teneur en eau. Cela signifie que la dynamique de ces genres dépend du stockage à long terme et que leur apparition est fonction de la variance de la teneur en eau des grains. Ainsi, ces genres peuvent être classés en tant que « mycoflore intermédiaire ou de stockage » : *Aspergillus*, *Ulocladium*, *Arthrotrixys*, *Penicillium* et *Mucor*. La proximité entre les variables explicatives « Etat d'infestation » et « HR_Equi » et les variables dépendantes *Penicillium* et *Mucor* indique que la présence d'insectes et une humidité relative élevée peuvent induire une prolifération abondante de champignons de stockage, situation observée avec la variété Apache à la fin de la période de stockage avec le développement des champignons des stocks du genre *Penicillium* (Fig. 35). Ni la dureté ni le niveau d'humidité relative n'ont eu une contribution significative.

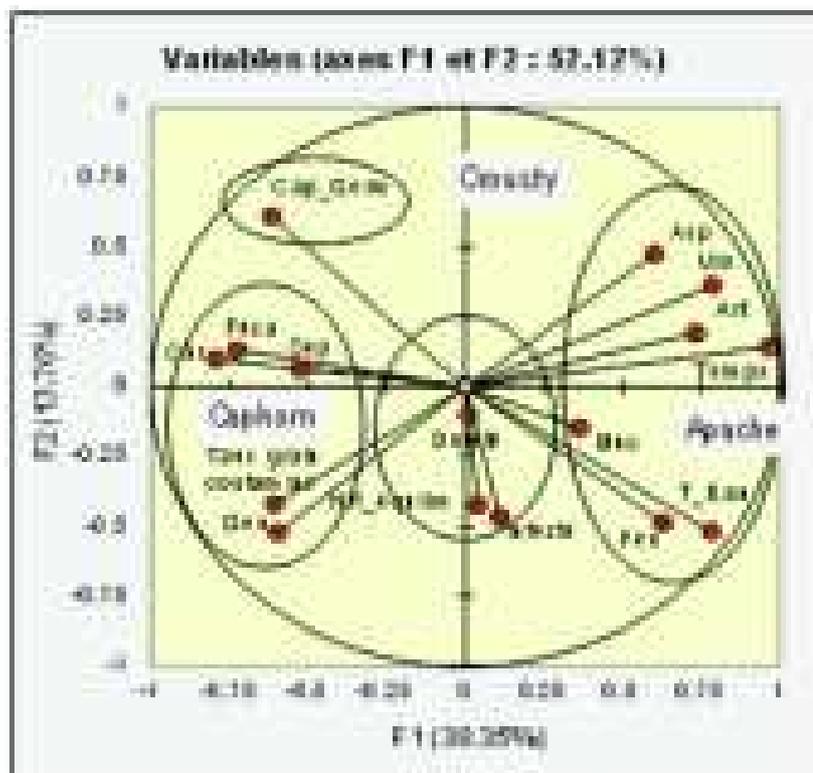


Figure 35 : ACP : Diagramme orthonormé visualisant les corrélations entre l'ensemble des variables (dépendantes et explicatives) mettant en évidence les interactions entre certains paramètres quantitatifs et la structure des communautés

d'espèces fongiques au cours d'un stockage de 160 j de 3 variétés de blé à dureté différente et conservées à 2 niveaux d'HR en présence ou en absence d'infestation par S. oryzae. T_Eau = teneur en eau ; TEMPS = durée de stockage

Le second axe de l'ACP a contribué faiblement à la variance totale (moins de 14%) ; néanmoins, il a été observé un effet négatif de l'infestation par les insectes sur la capacité germinative, l'influence du niveau de teneur en eau sur cette variable dépendante étant significativement corrélée (coefficient de corrélation : - 0,842 ; d.l : 5, 42 ; $P \leq 0,05$).

Quelques corrélations ont pu être expliquées par les propriétés des variétés soumises à l'expérimentation. Ainsi, il est ressorti que le pourcentage de contamination fongique des grains de blé est corrélé avec la dureté des grains du fait que la variété la plus contaminée à la récolte par les champignons des champs était Caphorn, appartenant au type hard (vs. semi-hard et tendre pour Apache et Crousty, respectivement). Cependant, cet état de fait pourrait être également relatif à une sensibilité réduite de la variété Apache à la contamination par *Fusarium* sp. qui était le plus abondant des genres mycologiques trouvé sur Caphorn à la récolte. Cette sensibilité moindre à la contamination par *Fusarium*, par comparaison aux deux autres variétés, est en accord avec le niveau de sensibilité intrinsèque de contamination par *Fusarium* sp., enregistré pour toutes les variétés de blé tendre cultivées en France (Du Cheyron *et al.*, 2011). Un important résultat a été obtenu dans cette présente étude relatif à l'absence de relation significative de la dureté des variétés de blé tendre avec les variations des genres mycologiques durant le stockage post-récolte. Néanmoins, les caractéristiques intrinsèques et les propriétés des variétés de blé ont eu une dépendance positive ou négative avec plusieurs variables liées à l'aptitude des grains au stockage de longue durée sans détérioration de leurs caractéristiques qualitatives (Tabl. 53). A partir des résultats de cette étude expérimentale réalisée sur un échantillon restreint de trois variétés de blé tendre couramment cultivées en France, il a pu être déduit que l'aptitude des variétés de blé tendre performantes (au niveau du champ et de la transformation) à tolérer des conditions environnementales critiques (HR élevée, risques de détériorations dues à l'infestation par les insectes et/ou l'infection par les champignons) n'est pas prise en compte en tant que critère important dans la création et la sélection variétale.

2-6-Indice de sensibilité variétale

Dans cette partie expérimentale, nous avons examiné la sensibilité des différentes variétés étudiées aux deux facteurs montrés les plus importants pour la baisse de l'énergie germinative au cours de la période des 160 j de stockage (cf. § 1.5.4). Nous avons donc procédé au calcul de l'ajustement des pourcentages de l'énergie germinative moyenne transformés en unités probit par une régression linéaire. La sensibilité des variétés à la détérioration qualitative au stockage a été assimilée à la perte d'une unité probit de l'énergie germinative initiale des lots de blé (celle mesurée après seulement 42 j de stockage). Cet indice est discriminant simultanément pour l'action de l'humidité relative (entre HR 75 %, favorable à la conservation de longue durée et HR critique de 85 %) et pour la sensibilité à l'infestation par les insectes (Tabl. 54). Ainsi, il a été observé à travers ce critère de diminution de l'énergie germinative que les variétés Apache et Crousty conservent une énergie germinative sur une très longue durée lorsqu'elles sont conservées à basse activité d'eau (a_w à l'équilibre avec 75 % HR), mais qu'elles sont plus sensibles que Caphorn lorsqu'elles sont conservées à une a_w critique (à l'équilibre avec 85 % HR). Dans cette dernière condition, la diminution de l'énergie germinative d'une unité probit est observée après 213 et 208 j respectivement pour Apache et Crousty, alors qu'elle n'est observée qu'après 400 j avec Caphorn. Sur la base de ce même critère, il est observé une sensibilité

à la détérioration par les insectes bien supérieure pour Crousty et surtout Apache que pour Caphorn. Ainsi, en a_w critique, ce critère passe de 222 j à 122 j et 38 j seulement pour Caphorn, Crousty et Apache, respectivement. A partir de ce critère de diminution de l'énergie germinative, un indice, permettant de quantifier la sensibilité à la détérioration qualitative au stockage (' Is ') des variétés de blé, a été proposé :

$$Is = (\text{pente de la régression de l'énergie germinative avec le temps}) * 1000).$$

Pour les trois variétés étudiées et les deux facteurs de sensibilité que permet de discriminer ce modèle (a_w et infestation par les insectes), les résultats obtenus dans cette étude montrent que les trois variétés se comportent très bien en a_w favorable à la conservation, mais que Caphorn supporte mieux que les deux autres la condition d' a_w critique (Tabl. 55). Pour la sensibilité aux attaques d'insectes, l'indice Is passe de 4,5 pour Caphorn à 8,2 pour Crousty et 26,6 pour Apache, qui est nettement plus sensible, en particulier lorsque l' a_w a dépassé le seuil critique estimé à une a_w à environ 0,80, soit 15,5 % de teneur en eau théorique à l'équilibre.

La variance de la sensibilité des différentes variétés de céréales aux attaques d'insectes a déjà été observée par de nombreux auteurs dont Dobie (1974), Amos *et al.* (1986), Baker (1988), Sinha *et al.* (1988), Haryadi (1991) et Fourar (1994). Nous avons pu, cependant, à partir de la présente étude, évaluer la part des différents facteurs à l'origine de cette sensibilité plus ou moins grande de variétés de blé à la détérioration qualitative pendant la conservation à long terme, ce qui rend l'indice proposé très discriminant entre les variétés.

Variété / HR	Température (jours)	Série infestée
V1H1	754	833
V1H2	400	333
V2H1	constant sur 180j	87
V2H2	318	38
V3H1	2408	133
V3H2	338	122

Tableau 54 : Durée (j) correspondant à la diminution de l'énergie germinative des lots de blé d'une unité probit (donnée tirée du modèle d'évolution de l'énergie germinative avec le temps) (% énergie germinative exprimé en probit) : Durée = 1/pente de l'équation de la régression linéaire

V1 = Caphorn ; V2 = Apache ; V3 = Crousty; H1 = 75 % HR ; H2 = 85 % HR

Tableau 55 : Comparaison des indices de sensibilité (Is) à la détérioration au stockage des trois variétés de blé lorsqu'elles sont stockées : i/ en conditions d'humidité critique de 85 % HR (vs. HR normale de 75 %) et ii/ en présence d'une infestation par les insectes (*S. oryzae*) (Is = pente de décroissance de l'énergie germinative en fonction du temps * 1000)

INTERACTIONS DYNAMIQUES INSECTES-MYCOFLORE ET LEUR INFLUENCE SUR LA QUALITE DU BLE EN COURS DE STOCKAGE

Variétés	HR normale	HR critique	HR normale avec insectes	HR critique avec insectes
<i>Caphorn</i>	1,4	1,2	2,5	4,5
<i>Apache</i>	0	4,7	11,5	26,6
<i>Crousty</i>	0,7	4,8	7,5	8,2

3-DISCUSSION

Dans le cadre des essais d'orientation méthodologique, il a été mis en évidence la faible sensibilité des espèces et variétés céréalières à l'attaque de *S. oryzae*, lorsque l'humidité relative était maintenue à un niveau relativement bas (HR \leq 65%), ce qui correspond à une teneur en eau des grains inférieure à 12 %. Parmi les trois céréales étudiées (blé tendre, blé dur et triticale) dans ces conditions de sécheresse prononcée, le blé dur s'est révélé réfractaire à l'infestation en ne permettant aucune descendance de l'insecte, par opposition au blé tendre et au triticale. Cette dernière espèce céréalière s'est montrée la plus sensible, une sensibilité qui pourrait être en relation avec une composition biochimique et une richesse en nutriments essentiels différente des blés. Une corrélation négative forte a été notée entre les variables 'dureté' et teneur en eau des grains de blé ($Cc = -0,965$). Quelque soit l'espèce ou la variété, les grains de blé humides ayant la dureté la plus faible ont été plus propices à la multiplication du charançon. La variabilité enregistrée sur le critère de taux d'accroissement des populations d'insectes (assimilé à la sensibilité aux attaques de l'insecte granivore) augmente à partir d'un taux d'humidité relative (H.R.) de conservation supérieur à 70 %, seuil correspondant à une teneur en eau des grains égale ou supérieure à 13%. Toutefois, il ressort de cette étude d'orientation que les céréales en grains présentent une sensibilité différente à l'infestation par le charançon, lorsque le seuil de teneur en eau minimum permettant le développement normal des charançons est dépassé (seuil critique situé au-dessus de 68% H.R., soit 12% de teneur en eau des grains à l'équilibre). Nos résultats sont en accord avec ceux publiés par Petit (1969) et Cahagnier et Fleurat-Lessard (1996), selon lesquels il existe une teneur en eau de sécurité ou 'seuil de sauvegarde' au-dessous duquel le grain peut se conserver pendant une longue durée sans détérioration qualitative, principalement par la mycoflore « de stockage ». Ce seuil de « sauvegarde » se situe vers 13% pour les céréales à conserver à long terme (une année ou plus), ce qui correspond à une humidité relative (H.R.) à l'équilibre de 70 % dans les conditions de température de climat tempéré. Dans des conditions favorables au développement de l'insecte granivore, nous avons observé que la sensibilité des grains à la conservation devient variable avec l'espèce céréalière et la variété. Par exemple, le blé dur de la variété '*Vitron*' a montré une sensibilité moindre à l'infestation par le charançon. Indépendamment de la sécheresse du grain, l'existence de cette variabilité spécifique et variétale à l'attaque par le charançon *S. oryzae*, pourrait être un des leviers à actionner pour introduire la « tolérance variétale » dans la combinaison des facteurs de prévention des risques de dommages causés par les insectes granivores dans la démarche de protection intégrée. Celle-ci constitue le fil conducteur de nos travaux.

Pour analyser l'influence du facteur variétal sur l'interaction entre conditions de conservation et variabilité de la sensibilité à l'attaque de l'insecte granivore *S. oryzae*, la seconde partie de nos travaux a eu pour objectif de mettre en comparaison trois variétés de blé tendre, à caractéristiques très différentes, au cours d'une conservation de plus de cinq mois dans des conditions d'H.R. différentes (niveau normal pour conservation sûre et niveau élevé pour conservation à risque microbiologique). L'influence de cette interaction « variété / conditions de stockage » sur la dynamique des populations du charançon *S.*

oryzae, a été observée en parallèle. Le critère de sensibilité variétale à la détérioration par développement des populations fongiques a été approfondi par l'étude de l'interaction « insectes / mycoflore / évolution qualitative du grain ». L'analyse statistique multifactorielle a confirmé que les variables qui prennent la part la plus significative de la variance ont été les suivantes : durée de stockage, teneur en eau des grains, densité des formes cachées de *S. oryzae* et nombre de propagules par g. Ces facteurs ont été montrés négativement corrélés à la faculté germinative et à la masse à l'hectolitre. La dynamique de population d'insectes a été montrée dépendante de la variété. Ainsi, la variété *Apache*, qui s'est démarquée des deux autres variétés par sa capacité d'absorption de l'humidité plus importante, a été le siège d'une infestation et d'une contamination microbiologique particulièrement élevées. Cependant, le taux d'accroissement des populations d'insectes et la dureté du grain ne sont pas significativement corrélés, ce qui a été confirmé par l'analyse en composantes principales (ACP). En conditions critiques de conservation et en absence d'insectes, la capacité germinative a diminué pour tous les traitements, davantage dans le cas des variétés qui ont eu la vitesse de détérioration la plus élevée en conditions critiques (présence d'insectes et H.R. élevée). L'évolution du peuplement fongique a été observée conforme aux données sur la succession des cortèges floristiques ; la flore champêtre, prépondérante à la récolte, a progressivement laissé la place à la flore intermédiaire mésophile puis à la flore xérotolérante de stockage vers la fin de la période de stockage. Au plan des principaux critères retenus pour apprécier les effets sur la qualité technologique des grains, l'indice de chute n'a pas varié significativement, alors que l'énergie germinative a chuté fortement, davantage pour les deux variétés « sensibles » aux conditions de stockage critiques, *Apache* et *Crousty*. Les autres critères qualitatifs ont été plus lents à évoluer que la capacité germinative qui s'est avérée le critère le mieux corrélé

à l'évolution des principales caractéristiques qualitatives recherchées pour le blé panifiable. Ce critère de baisse de la capacité germinative a été validé en tant qu'indice précurseur de la détérioration par les espèces fongiques de la flore « intermédiaire » et de stockage. Pour les trois variétés étudiées, cet indice est corrélé de façon très hautement significative à l'évolution différentielle des principaux facteurs de qualité des grains sous l'influence de l'infestation par les insectes et de l'envahissement fongique. En effet, il repose sur la vitesse de détérioration d'un facteur-clé du « niveau qualitatif » : la capacité germinative. Ce paramètre est l'indicateur le plus sensible permettant une réponse précoce du début d'une altération qualitative qui s'amorce en conditions critiques de stockage (température $\geq 22^{\circ}\text{C}$ et H.R. de 85 %). Ce nouvel indice de sensibilité des variétés de blé à des conditions critiques de stockage a varié de 0 à 26,6 selon que la variété est conservée indemne d'infestation et à 75 % H.R. ou, avec une infestation par *S. oryzae* et à niveau d'H.R. critique à 85%, respectivement.

Les indicateurs d'aptitude à la transformation n'ont varié significativement qu'au terme de la période de stockage pour les modalités de conservation avec infestation (diminution de la force boulangère de la farine (W) et du paramètre de gonflement de la pâte (G)). Ces résultats sont venus confirmer le déséquilibre rhéologique déjà observé dans les essais d'orientation et dans des études antérieures, sur des échantillons moyennement infestés (Fourar, 1987 ; 1994). Au niveau global des dommages induits par la conservation en conditions critiques, le facteur variétal a influé très nettement sur le niveau des pertes pondérales, ce qui était attendu en tant que confirmation des différences variétales d'aptitude à supporter des conditions drastiques de stockage. Finalement, la variété '*Apache*' s'est avérée la plus sensible aux conditions « critiques » de conservation, avec un taux d'accroissement des populations d'insectes le plus élevé, associé à une contamination fongique supérieure à celle des deux autres variétés. Cette sensibilité particulière à l'attaque

fongique a pu être corrélée positivement avec le niveau de l'équilibre qui s'établit au cours du stockage entre teneur en eau des grains et H.R. de l'atmosphère, supérieur dans le cas d'*Apache* à celui des deux autres variétés. Il a été déduit de ce résultat que les caractéristiques particulières de structure des couches cellulaires de l'enveloppe des grains (péricarpe, testa et couche d'aleurone) de la variété '*Apache*' influencent significativement l'absorption de l'humidité de l'air ambiant. Cette différence variétale devrait être logiquement associée à la composition et à la structure différente des enveloppes du grain de cette variété qui lui confèrent des propriétés physico-chimiques et mécaniques différentes (que l'on ne peut observer au niveau des propriétés

rhéologiques des farines). Nous avons choisi de rapporter cette différence éventuelle de composition et de structure des enveloppes du grain à la teneur en marqueurs stables contenus dans les tissus périphériques du grain : les alkylrésorcinols ; ces lipides phénoliques thermostables peuvent jouer un rôle dans les transferts d'eau au niveau des couches tissulaires périphériques du grain. Même si une différence de teneur en alkylrésorcinols totaux a bien été mise en évidence (la variété '*Apache*' présente la teneur la plus élevée comparée à celle des deux autres variétés), l'origine de cette différence et le lien éventuel avec les capacités des grains de cette variété à se réhydrater en ambiance humide n'ont pas pu être clairement établis.

La détermination systématique de la plus ou moins grande sensibilité des variétés de blé cultivées aux insectes des grains stockés que la méthodologie de cette étude a permis de révéler, pourrait constituer un levier complémentaire dans les approches de protection préventive des détériorations et dommages qualitatifs causés par les bio-agresseurs de stockage (insectes et microorganismes fongiques pour l'essentiel) (Fleurat-Lessard, 2002, 2003 ; Vincent *et al.*, 2009). Nous avons démontré que les caractéristiques physico-chimiques et les conditions de conservation des variétés (actuellement cultivées) sont en forte interaction avec leur sensibilité intrinsèque à la détérioration qualitative pendant la période de conservation de longue durée après récolte.

La suite de ce travail consisterait à approfondir la recherche sur les fondements de ces interactions entre structure, composition des tissus périphériques du grain et conditions de conservation en ambiance humide pour mettre en évidence les facteurs explicatifs de l'« aptitude » d'une variété à tolérer plus ou moins longtemps des conditions environnementales critiques (H.R. élevée, risques de détériorations dues à l'infestation par les insectes et/ou l'infection par les champignons), défavorables à la conservation de la qualité globale des grains pour une utilisation en alimentation humaine.

Il a également pu être déduit que l'aptitude des variétés de blé tendre performantes (au niveau du champ et de la transformation) à tolérer de mauvaises conditions de conservation est un facteur important de « durabilité » des caractéristiques de qualité des grains au cours du temps. Cette « aptitude au stockage prolongé en conditions critiques » n'est actuellement pas prise en compte en tant que critère important dans la création et la sélection variétale.

CONCLUSION GENERALE

L'étude des déterminants de la sensibilité des espèces et variétés de céréales actuellement cultivées à l'infestation par les insectes granivores stricts et à des conditions de stockage critiques, a été abordée dans l'esprit d'une contribution nouvelle à l'approche globale de la protection intégrée des céréales après récolte. L'objectif premier de la démarche de protection intégrée des stocks de grains est de rendre les conditions et les structures de stockage des céréales défavorables aux bio-agresseurs par la combinaison rationnelle de moyens d'action ou de mesures préventives permettant de maintenir les populations au-dessous d'un seuil critique (économiquement acceptable), en maîtrisant sur le long terme l'ensemble des critères de qualité pris en compte par les intermédiaires sur le marché des céréales, les opérateurs des industries de transformation et le consommateur final.

Les céréales sont sensibles aux attaques d'insectes spécialisés (granivores stricts), quelque soient les conditions de conservation. Par comparaison, la flore de stockage n'est capable de s'installer sur les grains et de causer une détérioration qualitative significative, qu'en condition d'humidité et de température dépassant un seuil critique.

Dans un premier constat sur le risque de détérioration qualitative des céréales après récolte, il a été observé une relative carence de données sur l'évolution des critères déterminant l'aptitude « au stockage prolongé » des espèces ou variétés de différentes céréales (blé tendre, blé dur et triticales). Pour établir un protocole rigoureux d'étude de l'évolution des caractéristiques qualitatives des céréales cultivées en Algérie pendant un stockage prolongé en conditions « naturelles », d'une part, et la mise en évidence des facteurs-clés qui déterminent la tolérance intrinsèque des variétés de céréales aux dommages causés par les insectes granivores d'autre part, une première étude a été centrée sur le comportement des espèces et variétés de céréales face à une attaque par les insectes « en conditions contrôlées ».

L'analyse comparative de la sensibilité du blé dur, du blé tendre et du triticales aux attaques de l'insecte principal des stocks de céréales, *Sitophilus oryzae* L., a permis de révéler des dynamiques de population de l'insecte fortement influencées par l'état physico-chimique du grain, avec des effets de seuil d'hydratation du grain inhibant le développement de l'insecte sur blé dur, ainsi que l'influence majoritaire de la teneur en eau du grain et de l'H.R.

sur le taux d'accroissement des populations. L'influence variétale a pu être évaluée, mais n'a pu être reliée de façon significative soit à la composition biochimique, soit aux autres caractéristiques qualitatives du grain.

La protection intégrée nécessite une connaissance approfondie des bio-agresseurs, non pas individuellement ou espèce par espèce, mais dans l'intégralité de leurs interactions. Une amélioration de l'efficacité des stratégies de protection intégrée appliquée aux stocks de céréales nécessite de se placer dans le cadre méthodologique particulier de l'approche globale de l'évolution qualitative de l'écosystème du stock de grain quand il est placé en état de déséquilibre (en conditions de conservation inadéquates, ce qui est relativement fréquent même dans les pays développés). L'étude approfondie des leviers susceptibles de limiter la prolifération des moisissures et la dynamique de multiplication des ravageurs, qui a été entreprise à partir des résultats de l'étude précédente d'orientation méthodologique, a

eu pour objectif l'analyse des interactions entre l'évolution des critères de la qualité sanitaire des grains et l'influence de conditions de conservation « à risque modulé » et de l'attaque de l'insecte granivore strict. Cette étude a été conduite selon une approche systémique originale de suivi de la détérioration qualitative de l'ensemble des paramètres intervenant dans l'appréciation de la qualité des grains pendant plus de 5 mois de stockage de variétés de blé tendre produites en France, en climat tempéré frais.

L'étude réalisée met en évidence les limites de l'application des principes de la protection intégrée en phase post-récolte. Le choix réduit de méthodes et mesures de prévention des risques que représentent les principaux bio-agresseurs des grains stockés (insectes et mycoflore mésophile et xérotolérante) nécessite, pour une plus grande efficacité de la protection, de trouver de nouveaux leviers d'action limitant la contamination et le développement des bio-agresseurs les plus dangereux pour la qualité finale d'utilisation, ainsi que des indicateurs précoces de la dérive des critères de qualité valorisables (ex. : capacité germinative).

Dans ce contexte, l'appréciation de l'aptitude au stockage prolongé à partir de critères de composition et d'état physico-chimique originel du grain à la récolte au moment de la mise en silo, doit être associée à une instrumentation des cellules de stockage permettant de détecter in situ ou sur prélèvement les zones les plus exposées à la réhydratation naturelle sous l'effet de conditions thermo-hygrométriques défavorables sur une longue période de temps. Pour la contamination par les moisissures, au-dessus du seuil d'activité d'eau et de température d'inhibition de croissance, le principal indicateur précoce de vitesse de détérioration qualitative est la capacité germinative ou mieux, l'énergie germinative. Pour la détermination des premiers insectes circulant, les pièges perforés permettent de détecter le début des infestations avant que la faible densité des insectes ne soit visible dans un échantillon représentatif.

L'appréciation de la variabilité des comportements des espèces et des variétés dans ces conditions de stockage « créatrices d'instabilité qualitative » est une première étape pour pouvoir hiérarchiser les facteurs de risque et adapter les stratégies de conservation sans risque. Ce facteur de « sensibilité à l'altération » des grains stockés en conditions précaires, est un indicateur qui permet d'orienter les itinéraires de stockage pour la maîtrise de la qualité globale. L'indice de sensibilité variétale à la détérioration au cours d'un stockage en conditions critiques, rend compte du risque à stocker la variété concernée en conditions précaires.

Le processus de choix de méthodes et mesures préventives ne peut se faire qu'à partir d'un nombre le plus important possible de critères ou de données techniques, voire économiques et réglementaires, dont il faut disposer en totalité pour prendre la bonne décision en fonction de seuils de risque prédéterminés (ex. : seuil de dommage économique). Ces seuils, montrés variables avec l'espèce de céréale et différentes variétés de céréales placées dans le même environnement thermo-hydrique et d'infestation par les insectes, n'ont pas les mêmes niveaux de risque de détérioration qualitative.

Les céréales d'importation provenant de pays tempérés frais peuvent avoir des risques supérieurs de détérioration que les variétés produites localement en Algérie. Le fait d'avoir quantifié et analysé cette variabilité devrait contribuer à favoriser la maîtrise de la qualité pendant le stockage sans perte d'aptitude à la transformation alimentaire ou sans dévalorisation ni réfaction sur la valeur marchande.